

**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN EL DISEÑO DE PARÁMETROS DE
ADQUISICIÓN SÍSMICA 3D3C PARA EL CAMPO TENERIFE**

AUTOR

MARÍA TERESA DUARTE CASTRO

DIRECTOR:

ANDRÉS E CALLE

CODIRECTOR:

SAÚL E GUEVARA



UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

2010

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABLAS.....	IX
RESUMEN	X
INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	5
2.1 Objetivo General	5
2.2 Objetivo Específico	5
3. METODOLOGÍA.....	6
3.1 Etapa 1.....	6
3.1.1 Creación de tres modelos geológicos	6
3.1.2 Simulación de la adquisición sísmica fija en los tres modelos	6
3.1.3 Generación diagramas de calidad	6
3.2 Etapa 2.....	8
3.2.1 Clasificación de la respuesta sísmica	8
3.2.2 Análisis Espectral	8
3.2.3 Comparación cuantitativa y cualitativa registros de onda PP-PS	8
3.2.4 Cálculo del espesor de la capa meteorizada	8
3.2.5 Correlación de los registros con información geológica.....	9
3.3 Etapa 3.....	9
3.3.1 Modelado geométrico de canal meándrico	9
3.3.2 Creación del modelo geológico y geofísico.....	9
3.3.3 Simulación de la adquisición sísmica en la profundidad del horizonte objetivo: canal meándrico.	10

3.3.4 Generación diagramas de calidad	10
3.4 Etapa 4.....	10
3.4.1 Diseño de cuatro configuraciones geométricas	11
3.4.2 Generación diagramas de calidad	11
3.4.3 Estimación de la varianza del cubrimiento en un segmento <i>x-line</i>	11
3.4.4 Análisis de la varianza de la amplitud en el dominio del número de onda	11
4. GENERALIDADES AREA DE ESTUDIO	12
5. CONSIDERACIONES GEOLÓGICAS Y GEOFÍSICAS CAMPO TENERIFE....	15
6. MARCO TEORICO.....	16
6.1 Propagación de las ondas sísmicas.....	16
6.2 Diseño de parámetros sísmicos 3D	19
6.2.1 Tópicos en el diseño PP	20
6.2.2. Tópicos en el diseño PS	25
6.2.4 Tipos de geometrías de adquisición:	28
6.3 Footprint.....	31
6.3.1 Definición	32
6.3.2 Adquisición de <i>footprint</i>	33
6.3.3 Métodos para la reducción del <i>footprint</i>	34
7. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS.....	35
7.1 Influencia del modelo geológico en los parámetros del diseño	35
7.1.1 Construcción de Modelos Geológicos y Geofísicos	35
7.1.2 Simulación de la adquisición sísmica: Onda PP-PS	40
7.1.3 Generación de diagramas de control de calidad del diseño	46
7.2 Influencia de los parámetros de carga en los registros sísmicos	51

7.2.1 Clasificación de la respuesta sísmica a partir de cinco configuraciones de Patrón	54
7.2.2 Análisis de frecuencias en las diferentes configuraciones de patrón	56
7.2.3 Comparación cuantitativa y cualitativa registros de onda PP-PS	61
7.2.4 Cálculo del Espesor de la Capa Meteorizada	71
7.2.5 Correlación de los registros con información litológica	73
7.3 Análisis de los parámetros de diseño: Tamaño de bin	77
7.3.1 Modelado Geométrico del Canal	77
7.3.2 Creación del Modelo Geológico y Geofísico	78
7.3.3 Simulación de la adquisición sísmica en la profundidad del horizonte "canal meándrico"	82
7.4 Configuración geométrica	85
7.4.1 Diseño de la geometría de adquisición	85
7.4.2 Generación diagrama de calidad: Cubrimiento	88
7.4.3 Estimación de la varianza del <i>fold</i> en un segmento in-line:	90
7.4.4 Análisis de la varianza de la amplitud en el dominio del número de onda	94
8. CONCLUSIONES	97
9. RECOMENDACIONES	99
10. BIBLIOGRAFIA	101

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Metodología análisis de sensibilidad	7
Figura 2. Ubicación zona de estudio.	12
Figura. 3 Interpretación de la línea sísmica DM871470E (Ecopetrol, 2003).....	13
Figura 4. Columna Estratigráfica generalizada en el Valle Medio del Magdalena (Ecopetrol, 2003).	14
Figura 5. Clasificación de la teoría de medios continuos (Sengbus, 1983)	16
Figura 6. Partición de la energía en la interface.	17
Figura 7. Dirección de propagación de las ondas elásticas.....	18
Figura 8. Etapas básicas en el diseño de parámetros sísmicos en onda PP. (Modificado de Galbraith, 1994; Stone, 1994).....	22
Figura 9. Máximo mínimo <i>offset</i> (xmin)	23
Figura 10. Punto común en profundidad "CCP"	25
Figura 11. Geometría Ortogonal.....	29
Figura 12. Geometría Aleatoria.	30
Figura 13. Geometría Diagonal.	31
Figura 14. Ejemplo de distribución de azimut para diferentes tamaños de <i>bin</i> (Duarte, 2008).	31
Figura 15. Ejemplo de adquisición de <i>Footprint</i> (Cooper et al., 2007).....	33
Figura 16. Modelo A Vista frontal.	36
Figura 17. Modelo B. A). Vista Frontal. B). Vista Superior.....	38
Figura 18. Modelo C. A). Vista superior modelo con fallas. B). Estructura contorno.	39
Figura 19. Imagen satelital Campo Tenerife (Modificada de google earth).	40
Figura 20. Iluminación Modelo A, A). Cubrimiento PP, B). Cubrimiento PS	42

Figura 21. Modelo de Capas Planas A). Geometría modelo. B). Trazado de rayos en horizontes planos.	43
Figura 22. A). Modelo Estructural "Modelo B". B). Trazado de rayos modelo B. ...	43
Figura 23. Cubrimiento Modelo B. A). Onda PP, B). Onda convertida	44
Figura 24. Cubrimiento Modelo C, A). Onda P, B). Onda convertida.	45
Figura 25. Distribución de cubrimiento. A. Modelo de capas planas. B. Modelado a partir de líneas 2D. C. Modelo C	47
Figura 26. <i>Flower plot</i> . A. Modelo de Capas planas. B. Modelo B.....	48
Figura 27. <i>Flower Plot</i> , A. Modelo B, C. Modelo C.	49
Figura 28. Distribución de offset. A. Modelo A, B. Modelo B, C. Modelo C.	50
Figura 29. Imagen Satelital Campo Tenerife: Ubicación línea experimental (Modificado Google Earth).	52
Figura 30. Diagrama que muestra la relación de la cantidad de pozos perforados en porcentaje en la línea experimental Tenerife 2D3C. A. Profundidad de perforación, B. Tamaño de carga.	53
Figura 31. Topografía línea experimental simulada a partir de la elevación de los receptores.	55
Figura 32. Respuesta sísmica configuración de patrón 1x10x2700 en tres zonas. A, C Terciario, B. Cuaternario.	55
Figura 33. Contenido de frecuencias para cinco configuraciones de patrón Zona 1 "Terciario".	58
Figura 34. Contenido de frecuencias para cinco configuraciones de patrón Zona 2 Cuaternario.....	59
Figura 35. Registro de disparo onda PP y onda convertida para la configuración de patrón 1x10x2700, sector 1.	62
Figura 36. Registro de onda PP y onda convertida para la misma configuración de patrón de 1x15x1800, sector 1	63
Figura 37. Registro de disparo onda PP y onda convertida para la configuración de patrón 1x15x3600, sector 2.	65

Figura 38. Registro de disparo onda PP y onda convertida para la configuración de patrón de 1x15x4500, sector 1.....	66
Figura 39. Registro de disparo onda PP y onda convertida para la configuración de patrón 1x20x2700, sector 1.....	67
Figura 40. Contenido de frecuencias de cinco configuraciones de patrón, Zona 1 "Terciario" onda convertida.	69
Figura 41. Contenido de frecuencias de cinco configuraciones de patrón Zona 2 "Cuaternario" onda convertida.....	70
Figura 42. Perfil de refracción sísmico línea experimental.	71
Figura 43. A y B Configuración de patrón 1x10x2700 para la zona 1. (1) Zona de <i>ground roll</i> , (2) Reflectores someros	72
Figura 44. Litología grupo Real, nivel arcilloso (Sandoval, 2010).....	73
Figura 45. Litología Grupo Real (Sandoval, 2010).	74
Figura 46. Depósitos Cuaternarios (Sandoval, 2010).....	75
Figura 47. Correlación registros sísmicos y geológicos Campo Tenerife A y C Terciario, B. Cuaternario.	76
Figura 48. Geometría canal meándrico.	77
Figura 49. A Modelo Capas Planas, vista superior del canal meándrico. B Modelo Tenerife vista frontal para el horizonte mugrosa zona c "1946m"	78
Figura 50. Componentes morfológicos de un sistema fluvial tipo meándrico (Modificado de Miall, 1996).	79
Figura 51. Análisis estadístico de los espesores de arena y arena neta con hidrocarburo para la formación mugrosa C. A. Pozo Tenerife 1, B. Pozo Tenerife 2. C. Pozo Tenerife3.	81
Figura 52. Iluminación Horizonte objetivo a 1946 metros "Canal Meándrico"	83
Figura 53. Iluminación Canal Meándrico. A. Tamaño de <i>bin</i> 10x10, B. Tamaño de <i>bin</i> 10x20, C. Tamaño de <i>bin</i> 20x10, D. Tamaño de <i>bin</i> 20x20	84
Figura 54. Configuraciones geométricas. A. Ortogonal. B. Aleatoria. C. Sinusoidal. D. Diagonal.....	85

Figura 55. Distribución de <i>fold</i> para onda convertida en geometrías aleatorias. A. Aleatoriedad 8m, B. Aleatoriedad 12m, C. Aleatoriedad 16m, D. Aleatoriedad 20m.	87
Figura 56. Geometría sinusoidal. A. Prueba 1, B. Prueba 2. C. <i>Fold</i> PS prueba 1, D. <i>Fold</i> PS prueba 2.....	89
Figura 57. Geometría Diagonal. A. Configuración geométrica. B. Diagrama de <i>fold</i> PS.	90
Figura 58. Diagrama de cubrimiento PS en cuatro geometrías de adquisición. A. Ortogonal, B. Aleatoria, C. Sinusoidal, D. Diagonal.	91
Figura 59. Diagrama de cubrimiento PS. A. Geometría Ortogonal, B. Geometría Aleatoria. C. Geometría sinusoidal, D. Geometría diagonal.....	92
Figura 60. Análisis del Espectro del número de onda A. Geometría Ortogonal, B. Geometría Aleatoria.	95
Figura 61. Análisis del espectro del número de onda. A. Geometría diagonal, B. Geometría Sinusoidal.....	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros geofísicos Campo Tenerife, (Duarte, 2008).....	36
Tabla 2. Parámetros de adquisición sísmica Tenerife 3D3C (Guevara, 2010).	41
Tabla 3. Configuraciones de parámetros de carga adquiridos en la línea experimental Tenerife 2D-3C, Campo Tenerife.....	52
Tabla 4. Parejas de patrón de comparación línea experimental 1.	56
Tabla 5. Parámetros geofísicos, horizonte objetivo Formación Mugrosa zona C.	80
Tabla 6. Espesor promedio de arena neta y arena neta con hidrocarburo, formación mugrosa C.	80
Tabla 7. Configuración geométrica para los cuatro diseños sísmicos.	82
Tabla 8. Pruebas de aleatoriedad.	86
Tabla 9. Pruebas geometrías sinusoidales.	88
Tabla 10. Patrón de las líneas de receptor.	93

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN EL DISEÑO DE PARÁMETROS DE ADQUISIÓN SÍSMICA 3D3C PARA EL CAMPO TENERIFE.

AUTOR: MARÍA TERESA DUARTE CASTRO

PALABRAS CLAVES: adquisición sísmica multicomponente, modelado, *bin*, *footprint*, *geometrías de adquisición*.

En esta tesis se realizó el análisis de sensibilidad de cuatro parámetros de diseño sísmico multicomponente y se evaluó la influencia de estos en la calidad de la imagen sísmica final para un caso particular de yacimientos compartimentalizados de ambientes fluviales.

El análisis se llevó a cabo en cuatro fases: la primera consistió en determinar la influencia del modelo geológico para una configuración de parámetros de adquisición fija, para ello se planteó tres suposiciones geológicas: (1) modelo de capas planas, (2) simulación de un volumen 3D a partir de líneas 2D, (3) interpretación del volumen 3D y se evaluó como varía la iluminación, distribución de *offsets* y azimut en cada una de ellas, obteniendo como resultado que en topografías suaves el efecto la distribución del *offset* en yacimiento compartimentalizados no es significativa, y que el efecto de la huella del diseño es atenuado en zonas donde se presenta mayor deformación estructural.

La segunda consistió en evaluar como los parámetros de perforación: tamaño y profundidad de carga afectan la respuesta sísmica PP y PS. Para ello se analizó 300 registros de disparo de onda convertida y onda compresiva en el espectro de frecuencia, obteniendo como resultado que el contenido de frecuencias necesario para iluminar el objetivo geológico “Formación Mugrosa” se encuentra en el rango de 10-15 metros.

El tercer parámetro consistió en determinar como el tamaño de *bin* afecta la interpretabilidad de una geoforma meándrica. Para ello se simuló un meandro a partir de la geometría del río actual debido a que en la zona no se cuenta con información estratigráfica. Se obtuvo como resultado que para el campo Tenerife es útil emplear tamaños de *bin* menores a 20 metros para evitar discrepancia en la interpretación del canal para los sectores sinuosos.

En la última etapa, se cuantificó a partir de cuatro configuraciones geométricas: (1) ortogonal, (2) aleatoria, (3) sinusoidal y (4) diagonal, cuál de ellas disminuye el efecto de la huella de diseño. Para ello se evaluó cada geometría en los diagramas de cubrimiento y dominio del número de onda, concluyendo que la geometría que atenúa este efecto corresponde a la geometría aleatoria. Además se identificó que este análisis se debe realizar complementariamente en dominio del número de onda debido a que existen geometrías “ diagonales ” que enmascaran dicho efecto en los diagramas de cubrimiento.

INTRODUCCIÓN

Los programas sísmicos por punto medio común *CMP*¹ son diseñados asumiendo que el camino del rayo reflejado entre fuente y el receptor es simétrico. Para diseños de onda convertida, sin embargo, el punto común de conversión *CCP*² no se ubica en el punto medio entre fuente y receptor, esto es debido a la asimetría del camino del rayo de la onda convertida. En el caso de conversión PS, el punto *CCP* se ubica más cerca de la posición del receptor, esta falta de simetría debe ser tomada en cuenta en el diseño de onda convertida. Si no lo es, podrían aparecer patrones de *fold*³ *CCP* (Lawton, 1993) y distribución periódica de zonas de bajo *fold* permitiendo la aparición de cierto tipo de patrón como el *footprint*⁴, el cual tiene un efecto perjudicial en el procesamiento (Cary, 1994^a) y afecta seriamente la interpretación 3D de onda convertida (Marfurt, 1998).

Varios autores han propuesto soluciones de tipo teóricas: Lawton, 2003; evaluó la eficacia de un diseño ortogonal versus uno diagonal para programas sísmicos 3D de onda convertida, obteniendo como resultado que la geometría diagonal atenúa el efecto de la huella del diseño en la dirección de las líneas de disparo. Lawton, 2003; comprobó que los patrones de *fold* PS cambian dramáticamente con un

¹ *CMP*: del ingles *common mind point*. Corresponde al punto de reflexión teórico entre fuente y receptor.

² *CCP*: del ingles *common conversion point*. En adquisición de onda convertida (PS), el CCP es el equivalente del punto medio común. Este es punto medio entre la fuente y receptor donde la onda se genera como PP y se refleja como PS.

³ *Fold* o cubrimiento: Es el número de trazas que se apilan en un *bin*.

⁴ *Footprint*: Es un patrón de ruido que está altamente correlacionado a la geometría de distribución de las líneas fuente y receptor en un tendido sísmico. Estas marcas o huellas afectan los datos adquiridos y son causadas por un muestreo espacial irregular originando problemas a la hora de procesar estos datos (Cordsen, 2000).

mínimo cambio en la relación V_p/V_s . Stewart, 1999; demostró que para tamaños de *bin* rectangulares “alargados en la dirección de los receptores” el cubrimiento en onda convertida es más pequeño que en la onda compresiva. Cordsen y Lawton, 1996; propusieron emplear el mismo tamaño de *bin* para onda convertida y onda compresiva sin renunciar a ninguna otra característica de diseño que no sea inherente a los diseños publicados anteriormente. Lawton, 1993; plantea un tamaño de *bin* óptimo para ondas convertidas a partir de mapeo asintótico. Eaton, 1995; demostró que la zona de *Fresnel* para la onda convertida es 80% más estrecha que en la onda compresiva para el mismo contenido de frecuencias.

Pero son muy pocos los estudios que se aplican a casos geológicos: Xioefeng y Shifan Z., 2007; resalta el cubrimiento CCP en geometrías de azimuth amplio y estrecho para un reservorio de cuerpos de arena con gas de ambientes continentales para el Campo Sulige en China. Guevara, 2006; realizó un diseño de parámetros sísmicos multicomponente enfocado a la detección de fracturas aplicado a la zona del Catatumbo en Colombia. Han-xing et al (2005); comparó tres parámetros de campo en una línea 2D-3C para iluminar cuerpos de arena de ambientes fluviales en el Campo Conroe-Texas; con el objeto de determinar que parámetros son mejores para la próxima adquisición 3D-3C en el área. Lansley, 1998; propuso una adquisición Piloto 3-D 3-C con el objetivo de evaluar las ventajas de la sísmica multicomponente al iluminar objetivos someros “Orinoco, Venezuela”. Magrave, 1997; formuló un diseño de *binning* asintótico con el objetivo de iluminar los canales del Cretácico “Blackfoot, Canadá”.

Con el objeto de integrar la información geológica con los requerimientos geofísicos en el diseño de parámetros multicomponente sin dañar la calidad de los datos y evitando la adquisición de artefactos “*footprint*”, es necesario conocer cuales parámetros del diseño son más influyentes en la calidad de la imagen sísmica final.

Varios autores se han concentrado en analizar la influencia de ciertos parámetros de manera independiente, esta tesis, se enfoca en el análisis integrado de cuatro parámetros de diseño multicomponente y la influencia de cada uno de ellos en la calidad de la imagen para un caso geológico particular de yacimientos compartimentalizados de ambientes fluviales. Dichos parámetros son: (1) el modelo geológico, (2) los parámetros de carga, (3) el tamaño de *bin* y (4) la configuración geométrica de adquisición.

Es crítico conocer cómo estos parámetros (1-4) afectan la calidad de la imagen cuando se integran diseños de onda convertida y onda compresiva en yacimientos fluviales. Debido a que de este tipo de yacimientos es extraída la mayor parte de los hidrocarburos en Colombia (Ecopetrol, 2003) y son escasos los campos que cuentan con una imagen sísmica 3D3C del yacimiento, es indispensable para futuros proyectos conocer cómo afectan ciertos parámetros de adquisición (1-4) la respuesta sísmica en ambientes fluviales, con el fin de ser aplicados en las próximas adquisiciones en el Valle Medio del Magdalena.

El desarrollo de este proyecto de investigación es presentado en cuatro etapas correspondientes con cada uno de los parámetros escogidos o seleccionados a saber:

1. Analizar la influencia del modelo geológico en el diseño de parámetros sísmicos. Para ello se fijo una configuración geométrica y se analizó los diagramas de iluminación para tres modelos geológicos de diferente complejidad estructural.
2. Analizar cuál es la influencia de los parámetros de carga en la respuesta sísmica para los dos tipos de onda PP y PS. Para ello se tomó como referencia la línea experimental 2D3C del campo Tenerife aprovechando

que esta línea fue adquirida con diferentes parámetros de carga. Se analizó la respuesta de las diferentes configuraciones de patrón y se determinó el espesor de la capa meteorizada para evaluar la respuesta sísmica de las unidades geológicas del Terciario y el Cuaternario.

3. Analizar como el tamaño de *bin* afecta a la iluminación de una geoforma meandriforme. Para ello se plantearon cuatro geometrías de adquisición con diferentes tamaños de *bin*. Con esto se analizó el cubrimiento en ciertos sectores del canal y como podría cambiar la interpretación del canal meándrico.
4. Analizar, formular y diseñar diferentes configuraciones geométricas de adquisiciones utilizando diagramas de cubrimiento y análisis bidimensional de Fourier. Con esto se identificó como podría disminuirse el efecto del *footprint* en diseños de onda convertida.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Analizar la sensibilidad de la información sísmica con respecto a los parámetros de adquisición de datos sísmicos 3D-3C para yacimientos fluviales.

2.2 Objetivo Específico

- Analizar la sensibilidad del modelo geológico en el diseño de los parámetros sísmicos.
- Evaluar la influencia de los parámetros de carga y profundidad en la calidad de la imagen sísmica.
- Analizar la sensibilidad en los parámetros de diseño con base en un modelo geológico de ambientes fluviales
- Estudiar los artefactos de adquisición a partir de diferentes configuraciones geométricas de adquisición.

3. METODOLOGÍA

Para dar solución a los objetivos planteados anteriormente, se desarrolla la investigación en cuatro etapas (Figura 1).

3.1 Etapa 1

La etapa 1 se analiza la influencia del modelo geológico para una configuración geométrica fija y se simula la iluminación en el horizonte objetivo, el cual está a una profundidad de 1950 metros, correspondiente a la Formación Mugrosa C, con el fin de evaluar como varía la iluminación, distribución de *offsets* y *azimut* en las tres suposiciones geológicas. La etapa 1, se desarrolla en tres fases:

3.1.1 Creación de tres modelos geológicos

Se construyeron tres modelos geológicos: Modelos A, B, C. El modelo A, es la suposición ideal de la geología es decir un modelo de capas planas. El modelo B, se consideró a partir de la interpretación de un grupo de líneas 2D del área. El modelo C, fue diseñado con base a la interpretación en tiempo del volumen sísmico 3D Campo Tenerife (Sandoval, 2010).

Los parámetros geológicos y geofísicos asignados al modelo: profundidad del objetivo, buzamiento, espesor de los canales, densidad, velocidad PP-PS de las formaciones geológicas, contenido de frecuencia son tomadas del informe interno de Ecopetrol, (Duarte, 2008).

3.1.2 Simulación de la adquisición sísmica fija en los tres modelos

Para la simulación de la adquisición sísmica se emplean los parámetros de diseño *post-plot* propuestos por Guevara (2010), para obtener la respuesta sísmica del terreno ante tres hipótesis geológicas en ondas PP-PS.

3.1.3 Generación diagramas de calidad

En esta fase, se calculan los diagramas de calidad como: cubrimiento, distribución de *offset* y *azimut* en los tres modelos geológicos para los dos tipos de onda PP-PS.

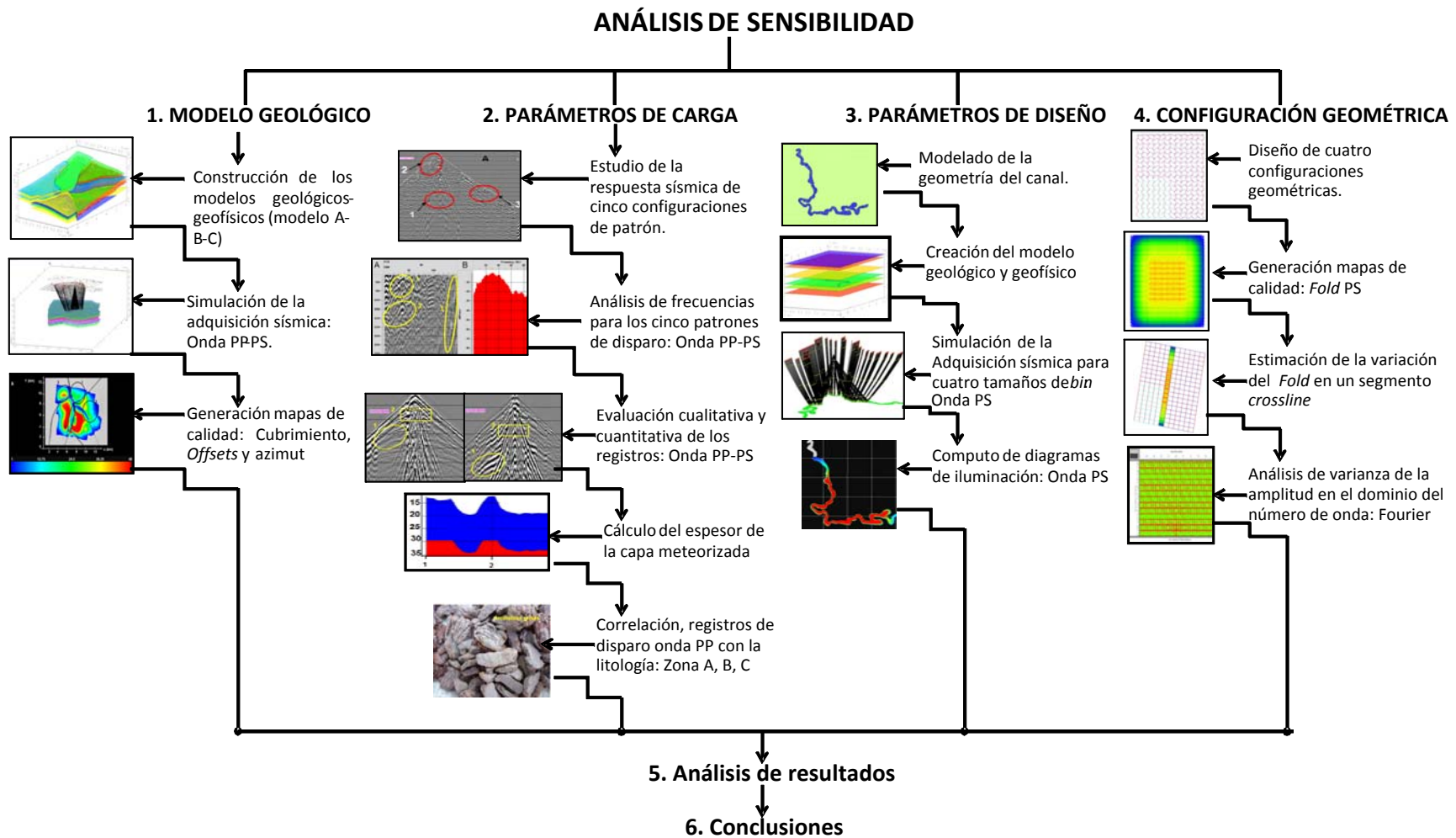


Figura 1. Metodología análisis de sensibilidad

3.2 Etapa 2

En la etapa 2, se analiza cómo los parámetros de diseño afectan la calidad del registro sísmico en los dos tipos de ondas PP-PS. La etapa 2, comprende las siguientes cinco fases:

3.2.1 Clasificación de la respuesta sísmica

Identificación de la respuesta sísmica a partir cinco configuraciones de patrón⁵ en tres sectores específicos del registro: reflectores someros, *offsets* lejanos y zona de *ground roll*, para los dos tipos de onda PP-PS. Adicionalmente, se asocia, la respuesta sísmica de las diferentes configuraciones de patrón a dos formaciones geológicas Terciario y Cuaternario.

3.2.2 Análisis Espectral

Se desarrolla en el siguiente orden:

- Cómputo del contenido de frecuencias para la profundidad objetivo.
- Comparación del contenido de frecuencias por parejas de configuración patrón.
- Análisis del contenido de frecuencias por sectores geológicos: Cuaternario, Terciario.

3.2.3 Comparación cuantitativa y cualitativa registros de onda PP-PS

Se evalúa la calidad de los registros sísmicos en dos sectores del registro: (1) reflector objetivo, (2) zona de *ground roll* para las dos formaciones geológicas del Campo Tenerife; Cuaternario, Terciario.

3.2.4 Cálculo del espesor de la capa meteorizada

A partir de la línea experimental 1 Campo Tenerife 2D3C, se simuló la línea de refracción 2D para calcular el espesor de la capa meteorizada en los dos sectores geológicos: Cuaternario, Terciario.

⁵ Configuración de patrón: consiste en la configuración de perforación del pozo, generalmente se enuncia el numero 1 seguido de la profundidad de perforación y el tamaño de la carga, por ejemplo 10 metros de profundidad y 2700 gramos de carga: 1x10x2700

3.2.5 Correlación de los registros con información geológica

En esta fase se recopiló la información de los registros de perforación, correspondientes al *uphole* 2 del campo Tenerife y se correlacionan con la información de los registros de disparo, con el objeto de identificar las tres zonas geológicas.

3.3 Etapa 3

En la etapa 3, se analiza cómo los parámetros de diseño: tamaño de *bin*⁶ y cubrimiento, afectan la iluminación y calidad de la interpretación de un canal meándrico para el caso de la onda convertida.

La ejecución de esta etapa, consiste de cuatro niveles:

3.3.1 Modelado geométrico de canal meándrico

El Campo Tenerife no cuenta con la interpretación estratigráfica de los canales, por tal razón, es necesario simular la geometría del canal a partir de la geoforma del río actual “río la colorada”.

3.3.2 Creación del modelo geológico y geofísico

La secuencia para realizar el modelo consisten en:

- Emplear el modelo A de la metodología 1, pero con la diferencia que en el bloque Mugrosa zona C se adiciona un horizonte con la geometría del canal meándrico modelado en la etapa anterior.
- Se identifican dos elementos geomorfológicos en el modelado geofísico del canal meándrico para el Campo Tenerife siendo estos: llanura de inundación y canal principal.

⁶ Tamaño de *Bin*: Es el área de un *bin*. Normalmente está determinada por el espaciamiento entre estaciones de disparo y receptor (Cordsen, 2000).

- Al modelo se asignan las propiedades geofísicas correspondientes a las asignadas en el modelo A de la etapa 1, excepto en el horizonte de Mugrosa zona C en el cual se toman con base a los autores Press (1996) para el canal principal y Wiest (1984) para la llanura de inundación.

3.3.3 Simulación de la adquisición sísmica en la profundidad del horizonte objetivo: canal meándrico.

Para analizar la iluminación en la geometría del canal meándrico se calcularon cuatro geometrías de diseño con similares características; área del diseño, distancia entre líneas receptoras y líneas fuentes, máximo y mínimo offset, apertura de migración⁷. Pero con la variante que cada geometría contiene diferentes tamaños de *bin*. Los cuatro tamaños de *bin* empleados para la iluminación de la onda PS fueron: (1) *bin* 10x10, (2) *bin* 10x20, (3) *bin* 20x10, (4) *bin* 20x20.

3.3.4 Generación diagramas de calidad

En esta fase, se calcula el cubrimiento de la onda PS para los cuatro tamaños de *bin* y se analiza como varia la iluminación del canal en los diferentes tamaños de *bin*. Además se evalúa, cuál de estos tamaños de *bin* permite fácilmente la interpretación del canal meándrico.

3.4 Etapa 4

⁷ Apertura de migración: Franja de adquisición que debe agregarse al área de cubrimiento completo (*full fold*) del programa para permitir una apropiada migración de cualquier evento buzante. Esta medida puede variar, y de hecho lo hace con frecuencia varía, para los diferentes lados del programa.

Finalmente en la Etapa 4, se analiza cómo podría minimizarse la huella del diseño a partir de cuatro configuraciones geométricas: aleatoria, ortogonal, diagonal, sinusoidal. Esta etapa se ejecutó en cuatro fases:

3.4.1 Diseño de cuatro configuraciones geométricas

Se emplean los parámetros de diseño *post-plot* propuestos por Guevara, (2010) y se varía la geometría de adquisición: ortogonal, sinusoidal, aleatoria y diagonal.

3.4.2 Generación diagramas de calidad

Se calcula el cubrimiento de la onda PS en las cuatro configuraciones geométricas y se analiza en cual geometría de adquisición se visualiza en menor cantidad el efecto de la huella del diseño.

3.4.3 Estimación de la varianza del cubrimiento en un segmento *x-line*

Se calcula el cubrimiento en la dirección *x-line*⁸ de las líneas de disparo 6-7, en las cuatro configuraciones geométricas "ortogonal, sinusoidal, aleatoria, diagonal" para visualizar el patrón de disparo y cuantificar en cual geometría varía más la distribución del cubrimiento.

3.4.4 Análisis de la varianza de la amplitud en el dominio del número de onda

Se genera el espectro de Fourier en el dominio número de onda *in-line* versus espectro de distribución Kx y Ky, para estimar cual geometría tiene menor varianza en la amplitud.

⁸ Dirección *x-line*: dirección en la cual se ubican las líneas de fuentes.

4. GENERALIDADES AREA DE ESTUDIO

El campo Tenerife se encuentra ubicado en el Valle Medio del Magdalena. Geográficamente está limitado al norte por el municipio de Barrancabermeja, al oriente por el campo La Cira-Infantas y al suroccidente por el municipio de Simacota. (Figura 2).

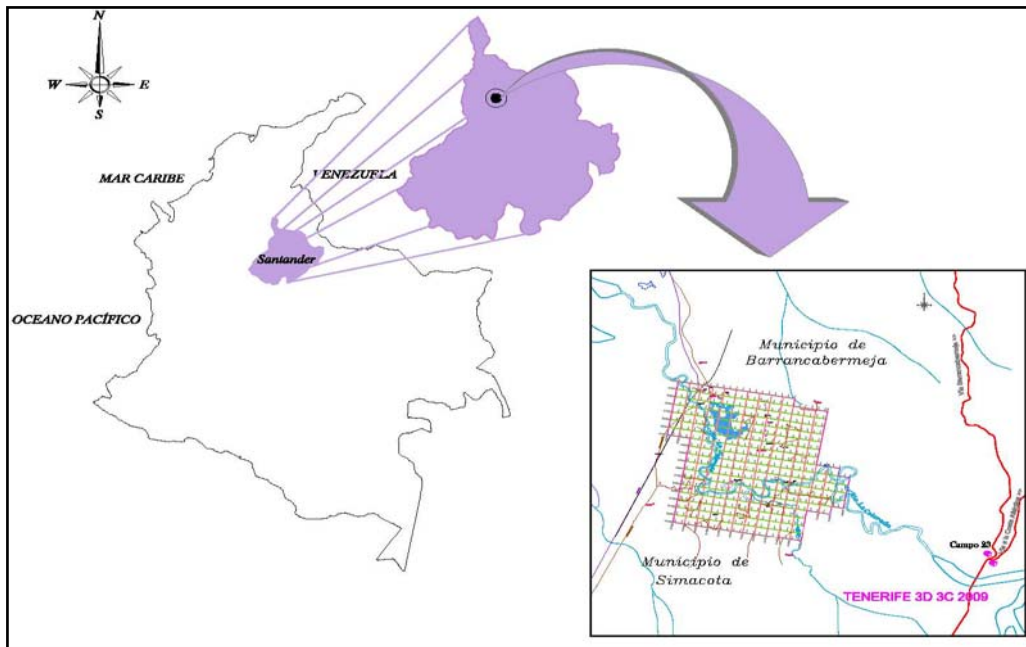


Figura 2. Ubicación zona de estudio.

El área de estudio se ubica dentro de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, localizada entre las cordilleras Central y Oriental. El Valle Medio del Magdalena está limitado al norte por la Falla Bucaramanga y al sur por la Falla de Cambao y cubre un área de 28300 km².

La cuenca constituye una depresión tectónica con dos márgenes diferenciados, al occidente como borde pasivo, caracterizado por una geometría monoclinal, con presencia de truncamientos de las formaciones Cretácicas, al oriente la deformación se incrementa pasando a formar un margen compresional Martínez et al (1988).

El Campo Tenerife se interpreta como una estructura compleja afectada por fallas de tipo inverso que compartimentalizan los diferentes yacimientos, produciendo bloques separados producto de este fallamiento (Figura 3). Además, se presenta, el desarrollo de anticlinales asimétricos suaves en el sentido E-W que buzcan fuertemente hacia el sur, en el sentido SW-NE, la estructura tiende a subir rápidamente hacia el campo Infantas. Las fallas de tipo inverso limitan los diferentes yacimientos y convergen hacia el norte permitiendo la formación de acuñamientos que cierra las estructuras en este sector, permitiendo la acumulación de hidrocarburos.

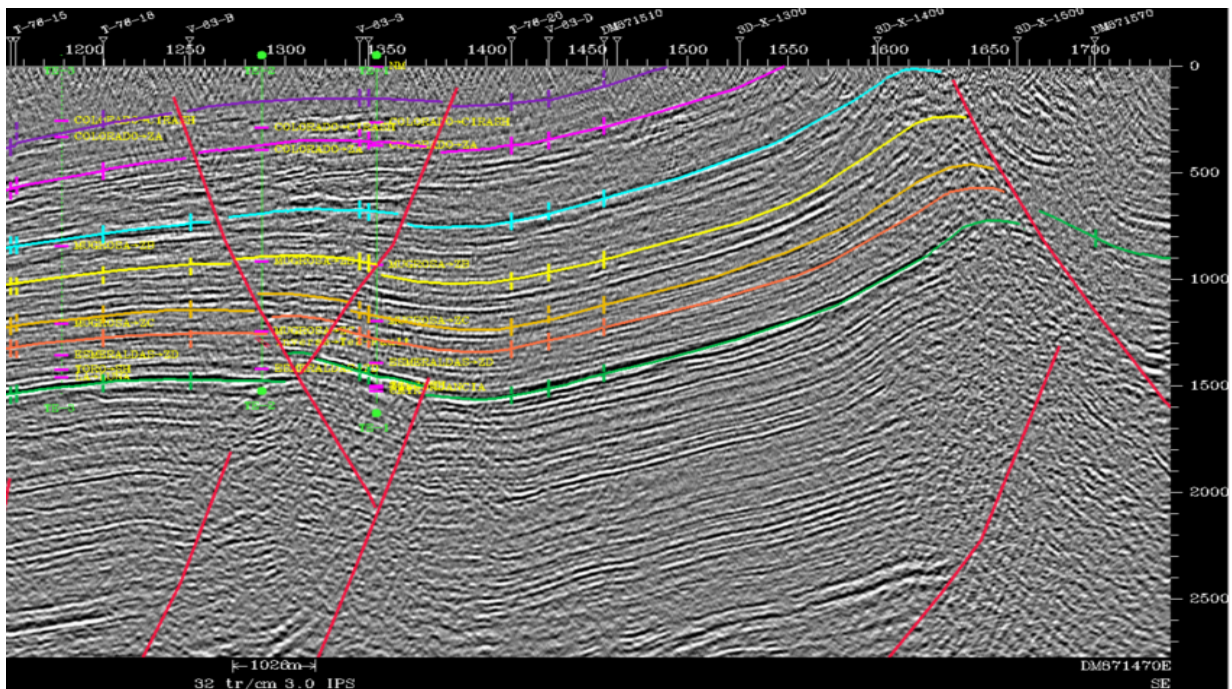


Figura. 3 Interpretación de la línea sísmica DM871470E (Ecopetrol, 2003)

La columna estratigráfica en el VMM (Figura 4) se encuentra cubierto por una columna sedimentaria que sobrepasa los 4800m de sedimentos continentales y marinos y cuya edad va desde el Triásico-Jurásico hasta el reciente (Suárez 1996).

Debido a los alcances de este proyecto las unidades de estudio corresponden a las unidades de edad Terciario. La unidad productora en el Campo Tenerife corresponde a la formación Mugrosa de edad Oligoceno-Mioceno (Figura 4).

PERIODO	EPOCA	FORMACION	LITOLOGIA
CUATERN.	PLEISTOCENO	MESA	
	PLIOCENO		
T E R C I A R I O	MIOCENO	REAL	
		COLORADO	
	OLIGOCENO	MUGROSA	
	EOCENO	ESMERALDAS	
		LA PAZ	
	PALEOCENO	DISCORDANCIA EOCENO-PALEOCENO	
		LISAMA	
C R E T A C E O	MAESTRICHTIANO	UMIR	
	CAMPANIANO	LA LUNA	
	SANTONIANO		
	CONIACIANO		
	TURONIANO		
	CENOMANIANO		
	ALBIANO	SIMITI	
	APTIANO	TABLAZO	
	BARREMIANO	PAJA	
		ROSABLANCA	
	VALANGINIANO	TAMBOR	
JURASICO		GIRON	
PREMESOZOICO		BASAMENTO	

Figura 4. Columna Estratigráfica generalizada en el Valle Medio del Magdalena (Ecopetrol, 2003).

El Campo Tenerife produce petróleo tipo “*black oil*” con gravedad promedio de 20 °API, el hidrocarburo se extrae de la Formación Mugrosa zona C de edad Oligoceno – Mioceno inferior que fue depositada en sistema de ambiente fluvial.

La Formación Mugrosa presenta porosidades del 15% al 23% y permeabilidades entre 10 y 19 md. Los espesores de arena neta petrolífera se encuentran en los rangos: En Tenerife (1) 4.41 metros y Tenerife (2) 13.36 metros.

En el campo se han perforado tres pozos: Tenerife 1, Tenerife 2 y Tenerife 3, de los cuales el tercero resultó seco.

Para el Campo Tenerife se estimó OOIP de 21.9 millones de barriles, el cual fue distribuido en 16.6 millones de barriles de aceite original para el bloque Tenerife-2 y 5.3 millones de barriles de aceite original para el bloque Tenerife-1, con un factor de recobro para todo el campo hasta la fecha de 1.89% (Ecopetrol, 2003).

5. CONSIDERACIONES GEOLÓGICAS Y GEOFÍSICAS CAMPO TENERIFE

El área en kilómetros cuadrados para iluminar la estructura del Campo fue de 24 km², 6 km en la dirección *inline*⁹, perpendicular a la estructura geológica y 4 km en la dirección *x-line* “paralelo a la estructura”. El objetivo geológico corresponde a la Formación Mugrosa compuesta por intercalaciones de areniscas de grano fino y lodolitas varicoloreadas, acumuladas dentro de un ambiente de sistemas de ríos meándricos. Esta formación geológica se encuentra en el área del programa a tiempo dobles de 1155 ms.

Con respecto al nivel topográfico, las profundidades para iluminar la Formación Mugrosa C están alrededor de 1793,44 a 1856,84 metros. Los espesores promedio de esta formación en el área de interés son: en Tenerife 1 458,14 metros, Tenerife 2 493,12 metros y Tenerife 3 470,13 metros. Los buzamientos son aproximadamente 25 grados, la apertura de migración corresponde aproximadamente a 800 a 1300 metros (ECOPETROL, 2009). La frecuencia necesaria para iluminar la estructura geológica es 40Hz aproximadamente (Duarte 2008). Los requerimientos de cubrimiento *post* apilado para Tenerife están en el rango de 42 a 77 (ECOPETROL 2009).

⁹ Dirección *in-line*: dirección paralela a las líneas de receptores.

6. MARCO TEORICO

6.1 Propagación de las ondas sísmicas

Cuando se acciona una fuente sísmica ocurren dos clases de reacciones en el medio circundante (Sengbush, 1983) según el tipo de deformación (Figura 5). La primera, una reacción inelástica o plástica en la cual la relación esfuerzo-deformación es no lineal, es decir, se causa una deformación permanente sobre la roca justo alrededor de la fuente. En el caso de dinamita, se produce una alta facturación y hasta remoción de las rocas. La energía consumida en esta reacción no contribuye al pulso sísmico y por tal razón, es perdida. La segunda reacción, la elástica, es aquella en la cual la relación esfuerzo deformación es lineal, esto es, el cuerpo es deformado momentáneamente, pero tan pronto como se remueva la influencia de la fuerza deformante el cuerpo recupera su forma original. Es la energía de esta reacción, la que genera el pulso sísmico que viaja a través de la tierra (White, 1978).

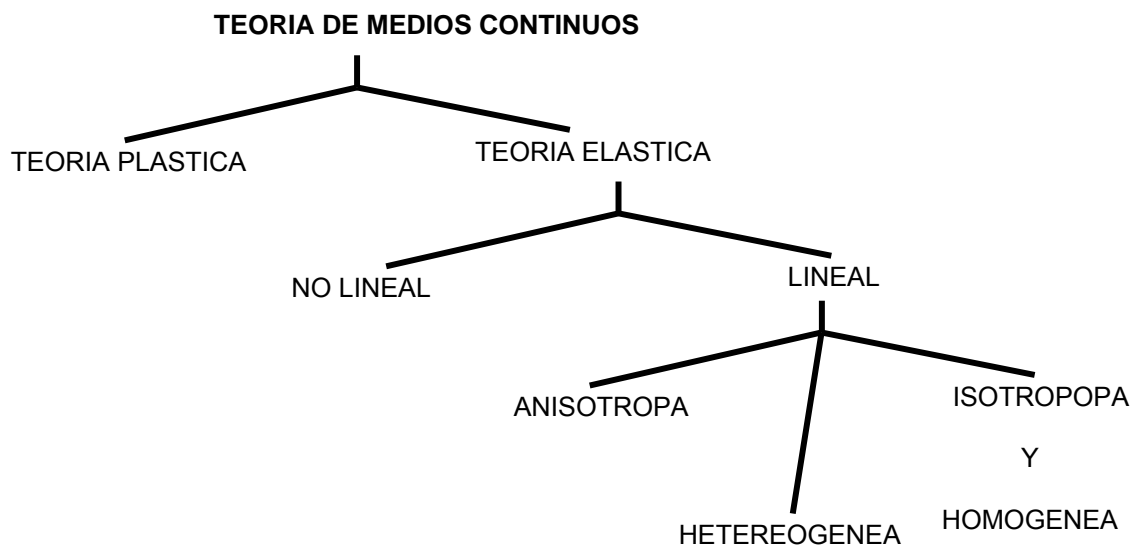


Figura 5. Clasificación de la teoría de medios continuos (Sengbus, 1983)

El marco básico de este trabajo es la teoría de propagación de ondas elásticas a través de medios homogéneos isotrópicos en tierra. Esta es una teoría muy desarrollada, de la que algunos aspectos relevantes se presentan a continuación.

Un material elástico se deforma bajo la acción de una fuerza externa y una vez se retira la carga, recupera su forma original, lo que genera una perturbación que se propaga a través del medio. Esta recuperación es el origen de las ondas elásticas. Cuando una onda sísmica encuentra un cambio en las propiedades elásticas del material, parte de la energía continúa en el mismo medio (onda incidente), parte se refleja (ondas reflejadas) y el resto se transmite al otro medio (ondas refractadas) con cambios en la dirección de propagación, y en el modo de vibración. (Figura 6)

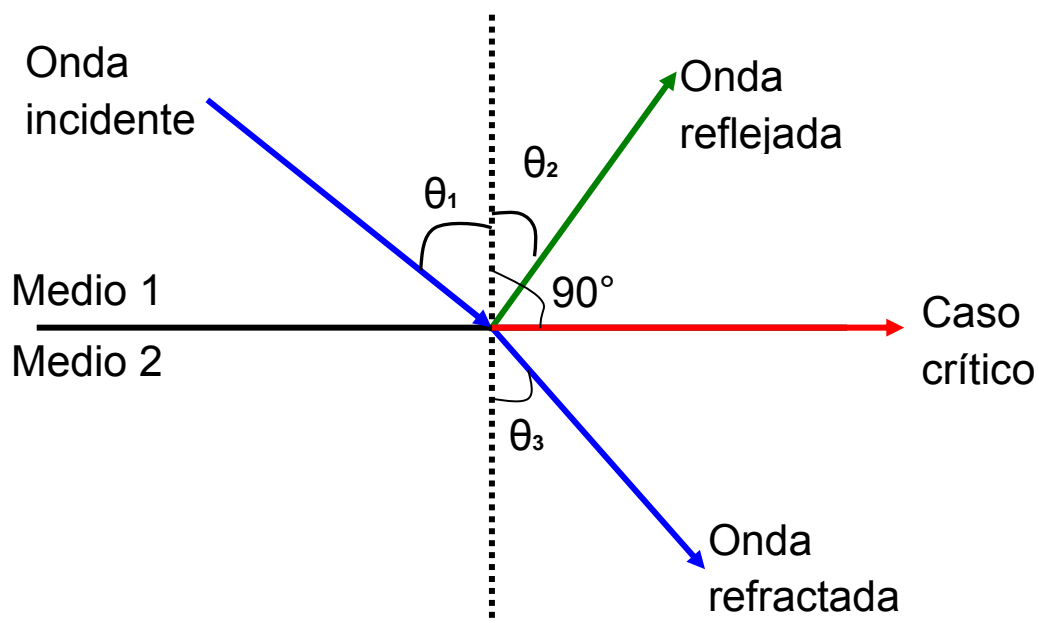


Figura 6. Partición de la energía en la interface.

Solo dos tipos de ondas pueden propagarse en el interior de un material homogéneo e isótropo (Sengbush, 1983), las cuales son: ondas de compresión y ondas de cizalla. Las ondas compresionales u ondas P son las que se transmiten cuando las partículas del medio se desplazan en la misma dirección de propagación de la energía, mientras que las ondas de cizalla u ondas S hacen vibrar las partículas

perpendiculares a la dirección de propagación (Figura 7), las ondas S se propagan a menor velocidad que las ondas P.

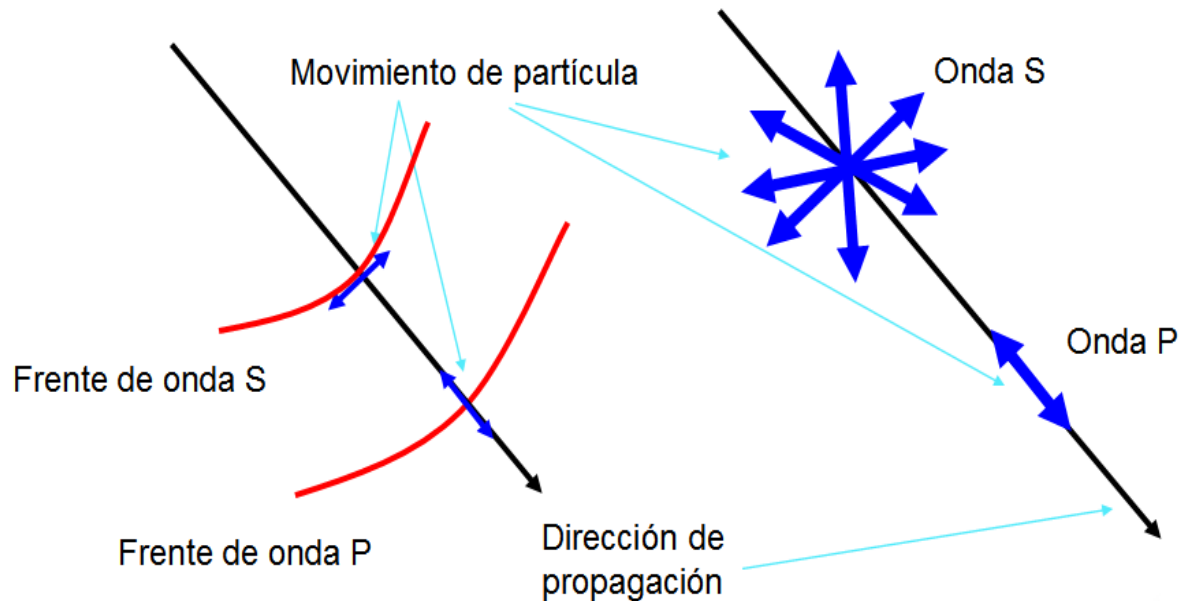


Figura 7. Dirección de propagación de las ondas elásticas.

La propagación de las ondas es descrita matemáticamente por la ecuación de onda y depende de las propiedades del medio, definidas por las constantes elásticas. Asumiendo un medio isótropo y homogéneo, existen dos constantes elásticas las cuales pueden ser descritas en muchos aspectos. Quizás el más común es usar los parámetros λ , μ , reciben los nombres modulo de compresibilidad y cizalla, o rigidez, respectivamente también denominados parámetros de Lamé. De la misma forma, μ y κ , pueden ser usados y κ es el módulo de incompresibilidad.

De la ecuación de onda para materiales homogéneos e isótropos se deducen dos modos de propagación de onda a través de un medio no acotado: Onda compresional o primaria y Onda de cizalla o secundaria. Sus velocidades respectivas, usando las constantes elásticas μ y κ debido a su significado físico, son:

$$v_p = \sqrt{\frac{\kappa + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Ecuación (2)

Donde ρ es la densidad de masa.

6.2 Diseño de parámetros sísmicos 3D

El diseño de adquisición sísmico implica la configuración adecuada de un conjunto de parámetros para lograr un set de datos sísmicos interpretable. El diseño sísmico es considerado como un problema de optimización de Musser (1989), que consolida, el mínimo costo, los requerimientos de cobertura, azimut y *offsets* para un objetivo geológico particular, el tipo de terreno y el fácil acceso son también factores en el diseño. Para alcanzar un diseño óptimo enfocado a un objetivo en particular es deseable incluir tantas variables como sea posible, siempre y cuando dicha información sea confiable, con el objeto de lograr una buena distribución de puntos de reflexión en el subsuelo (Galbraith, 1994).

El diseño de parámetros de adquisición sísmicos 3D se ha convertido en un tópico importante, ya que es visto como el eslabón débil de la adquisición, procesamiento e interpretación (Stone, 1994). En el caso de adquisición sísmica de onda convertida, las consideraciones de diseños CCP hacen aún más complicado el diseño de programas sísmicos 3D.

Una ventaja que ofrece el registro de onda convertida es la adquisición simultánea con la onda P mediante el uso de la misma fuente. Esto hace que sea un método considerablemente más fácil y rápido para adquirir ondas convertidas y ondas P (Garotta, 1990). Debido a esta dualidad en la adquisición, los diseños de onda P-P y P-S no deberían ser diseñados independientemente el uno del otro: diseños óptimos atribuidos a ambos deben ser combinados para lograr datos migrados P-P y P-S con mejor calidad para integrar las interpretaciones.

Para una adquisición dual, la base del diseño puede seguir los parámetros de adquisición de la onda compresional usando criterios de diseño CMP existentes, esto en consideración a que los datos compresionales continuarán proveyendo la base de la interpretación. Para que la información de la onda convertida, complemente la información de la onda compresiva, criterios de CCP deben ser incluidos en el diseño pero sin perjudicar la calidad de los datos de la onda compresiva. Un inadecuado diseño sísmico puede comprometer severamente la calidad de los datos de onda convertida, y minimizar la contribución en la interpretación en general.

6.2.1 Tópicos en el diseño PP

Los pasos básicos para un diseño sísmico ortogonal compresional de geometría estándar ortogonal son resumidos en la figura 8 (Galbarith, 1994; Stone, 1994). El paso inicial en el diseño de parámetros de adquisición 2D O 3D es determinar los parámetros básicos como: tamaño del *bin*, profundidad del objetivo, cubrimiento, tiempo de registro, tamaño del diseño, máximo y mínimo *offsets* requerido para iluminar los objetivos geológicos someros y profundos. Estos parámetros son buscados en el modelado geológico o previos estudios en el área.

El cálculo más importante en un programa sísmico es el número de disparos por km² (Stone, 1994), el cual está determinado por:

$$NS = \frac{F}{C \cdot b_x \cdot b_y} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

NS= el número de disparos por kilómetro cuadrado

F= *Fold* nominal

C= Número de canales disponible para el registro

b_x= dimensión del *bin* en la dirección x (Km)

b_y= dimensión del *bin* en la dirección y (km)

El parámetro NS es la base para el cálculo de las siguientes etapas (Figura 8). La siguiente variable para calcular es el incremento en la línea de disparo. El valor de SL muestra el mínimo *fold* obtenido para un tamaño de *bin* y número de canales disponibles (Stone, 1994).

$$SL = \frac{1}{2 \cdot b \cdot NS}$$

Ecuación (4)

Donde:

SL: Incremento línea de disparo

b= dimensión del bin perpendicular a la orientación de la línea de disparo

NS= número de disparos por km²

El máximo mínimo offsets¹⁰ (Xmin) junto con el *bin* controlan el incremento entre líneas receptoras (RL). El Xmin debe ser menor que la profundidad del reflector somero que necesita ser registrado (Galbraith, 1994). Esto garantiza adecuado imageamiento del reflector somero.

¹⁰ Máximo mínimo *offsets*: es definido como la hipotenusa entre el par fuente y receptor más distante del rectángulo formado por dos líneas de receptor y disparo adyacentes.

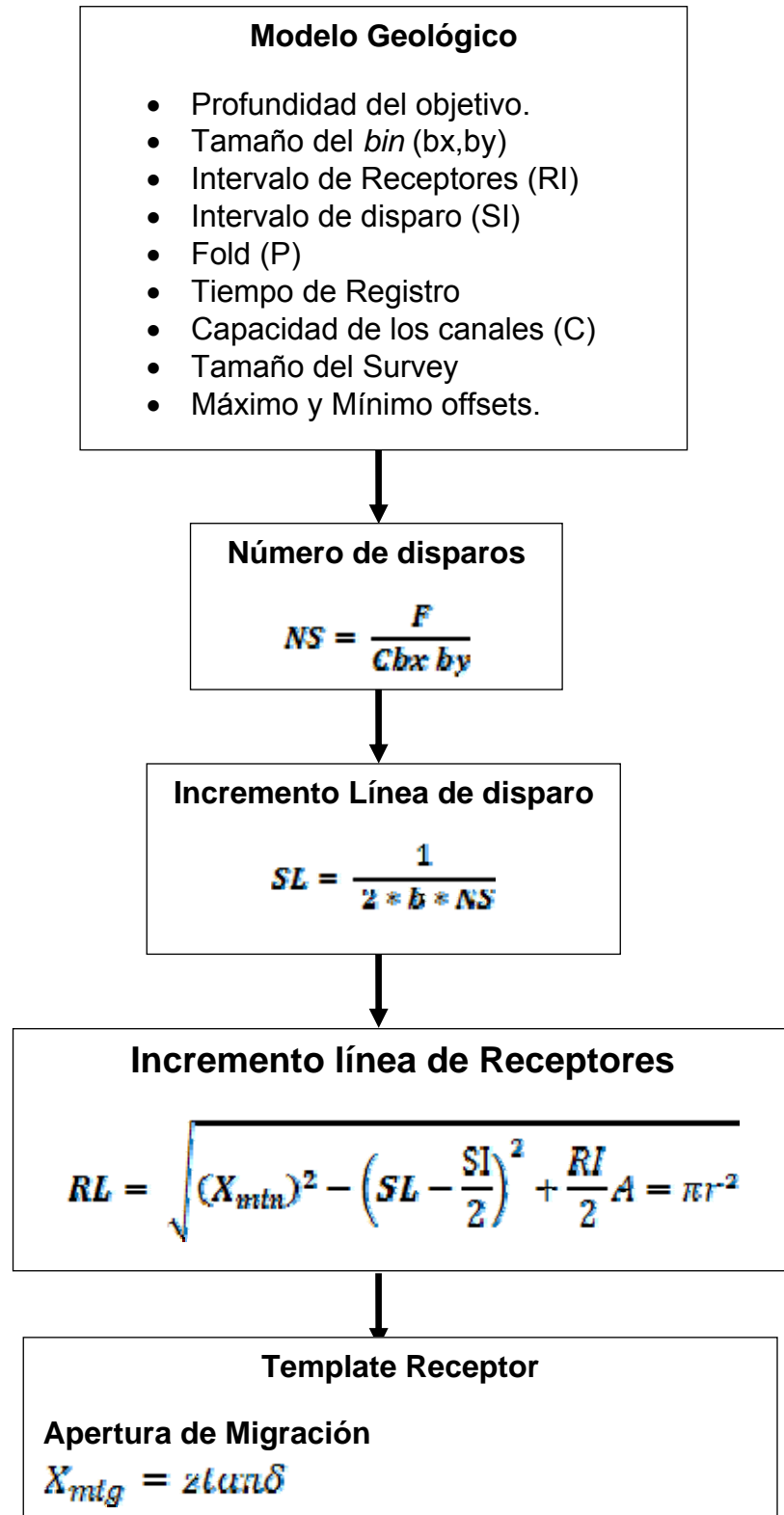


Figura 8. Etapas básicas en el diseño de parámetros sísmicos en onda PP.
(Modificado de Galbraith, 1994; Stone, 1994)

En la Figura 9, el RL es relacionado al SL y X por la relación de Pitágoras:

$$RL = \sqrt{(X_{min})^2 - \left(SL - \frac{SL}{2}\right)^2} + \frac{SL}{2} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde RL= incremento líneas receptoras

SL= incremento líneas de disparo

Xmin= El mínimo máximo offset

SI= incremento de disparos

RI= incremento de receptores

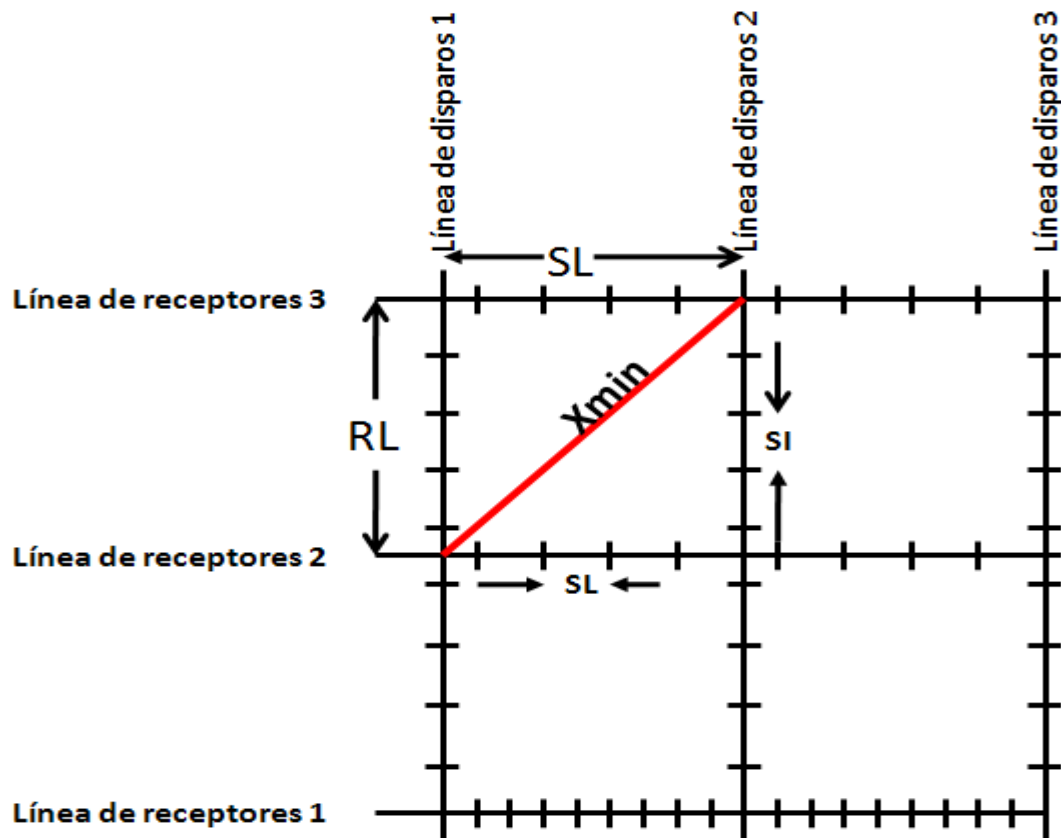


Figura 9. Máximo mínimo *offset* (xmin)

El área cubierta por las líneas receptoras, conocida como *template*¹¹ o *patch*¹² del registro, es determinada por RL y SL así como el número de canales por registro. Como regla general, la dimensión del *template* tiene que diseñarse de tal forma que no exceda la máxima profundidad del objetivo. En el caso de reflectores buzantes, un *offsets* adicional debe ser computado: la apertura de migración (Yilmaz, 1987) es el registro adicional de *offsets* que debe ser incluido por el buzamiento de la estructura a imagear. Una de las dimensiones del *template* puede ser extendida para registrar la zona adicional “apertura de migración”. La extensión del registro del *template* en una dirección preferencial podría tener distribución *narrow*¹³, proporcionado el mismo número de canales de registro (Lansley, 1994).

La apertura de migración es calculada con la siguiente expresión:

$$x_{mig} = z \tan \delta \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde x_{mig} = apertura de migración

Z = profundidad del objetivo

δ = buzamiento de la estructura

La forma del *template* y la posición de las fuentes con esta determinación de azimut fuente-receptor con cada *bin*. Un rango amplio de azimut asegura buen acoplamiento de estáticas. Ellos también son requeridos para análisis AVO 3D, detección acimutal anisotropía, y eliminación de ruido (Landsey, 1994). La distribución amplia de *offset* previene el aliasing y asegura un análisis de velocidad robusto (Galbraith, 1994).

¹¹ *Template*: Es la unión de un *patch* particular dentro del cual se registra un salvo.

¹² *Patch*: Se refiere a todas las estaciones receptoras “vivas” de un punto de tiro cualquiera.

¹³ *Distribución Narrow*: Cuando la relación entre el máximo *offset in-line* y el máximo *offset x-line* es mayor que 3.

6.2.2. Tópicos en el diseño PS

Los programas sísmicos de onda compresiva, son diseñados asumiendo que el camino del rayo entre fuente y el receptor son simétricos. Para diseños de onda convertida, sin embargo, el punto común de conversión “*common conversion point CCP*” no se ubica en el punto medio entre fuente y receptor, esto es debido a la asimetría del camino de rayo de la onda convertida (Figura 10), el punto *CCP* tienden a ser concentrado más cerca de la posición del receptor y no en el punto medio. Esta falta de asimetría, debe ser tomada en cuenta en el diseño de onda convertida, si no lo es, podrían aparecer patrones de *fold CCP* (Lawton, 1993) y distribución periódica de zonas de bajo *fold*. Rápidas variaciones en el *fold* tienen un efecto perjudicial en procesamiento (Cary, 1994a), y pueden comprometer seriamente la interpretación de onda convertida 3D.

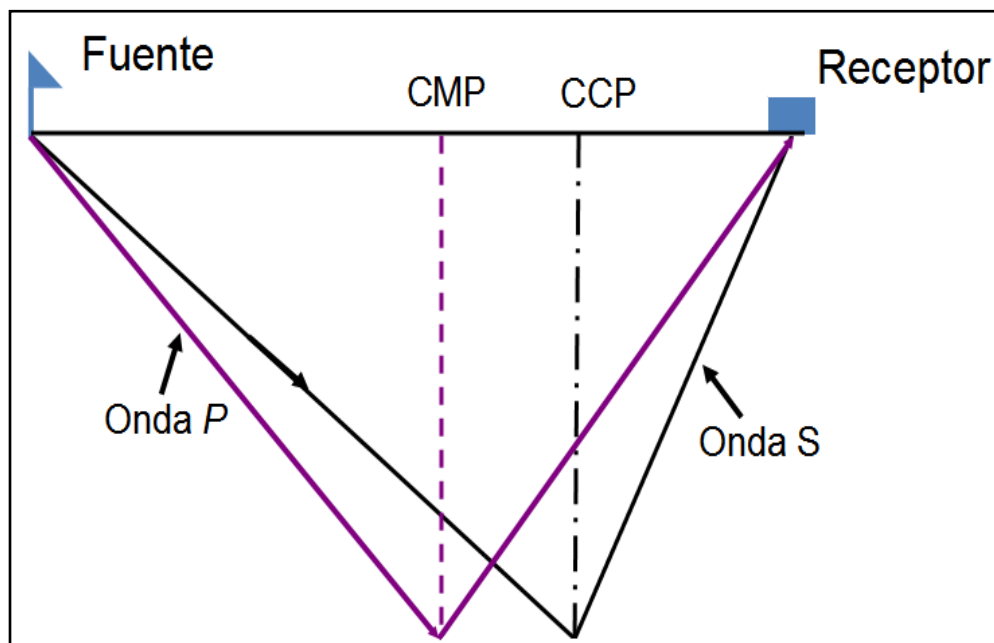


Figura 10. Punto común en profundidad "CCP"

Por tal razón, es importante prestar atención en el cálculo de ciertos parámetros que para el caso de ondas convertidas son calculados de forma diferentes, tales parámetros son:

6.2.2.1 Punto común de conversión

Numerosos autores se han enfocado en proponer métodos para el cálculo del *CCP*, entre las principales técnicas se encuentran: el método asintótico (Behle y Dorh, 1985), sorteo de trazas a una sola profundidad (Tessmer y Behle, 1988) y mapeo del *CCP* variando la profundidad (Eaton et al., 1990).

6.2.2.2 Tamaño de *bin*

Diversos autores han dado solución para el tamaño y geometría del *bin*, los principales son: *Lawton, (2003)* propone usar tamaños de *bin* largos con el efecto de suavizar los patrones de *bin CCP*, *Lawton (2001)* expone la simulación de dos líneas de cables marinos paralelas para obtener un mejor muestreo del punto *CCP* en profundidad para geometrías marinas, *Lane (1994)*, propuso una implementación de *binning* 3D asintótico, (*Lawton, 1993*) propuso calcular el óptimo tamaño de *bin* a partir del mapeo del *CCP* asintótico; *Cordsen (1993b)* propuso usar el mismo tamaño de *bin* para los tipos de onda PP-PS por medio del fraccionamiento del *Bin* (Flexi-Bin®), *Eaton y Lawton, (1992)* proponen usar intervalos de líneas fuente que no sean múltiplos enteros de líneas de receptor.

La ecuación establecida para el tamaño de *bin* óptimo es (Lawton, 1993):

$$b_x = \frac{RF}{1 + \frac{v_s}{V_p}} \quad \text{Ecuación (7)}$$

$$b_y = \frac{SF}{1 + \frac{v_s}{V_p}} \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde b_x dimensión del *bin* en la dirección *inline*.

b_y dimensión del *bin* en la dirección *cross-line*

RI: espaciamento receptores en la dirección *inline*.

SI: espaciamento de los disparos en la dirección *crossline*.

Vp: velocidad de la onda P

Vs: velocidad de la onda S

6.2.2.3 Zona de Fresnel

La zona de *fresnel* es usada para estimar la resolución lateral de una sección sísmica de datos apilados no migrados.

El concepto de zona de *fresnel* para ondas PS ha sido desarrollado por Eaton (1991) por la siguiente expresión:

$$R_{P-S} = \frac{V_m}{2} \sqrt{t_{0P-S} * T}$$

Ecuación (9)

Donde,

R_{P-S} - Radio de la zona de *fresnel*

Vm= zero-offsets velocidad de migración P-S

t_{0P-S} = Tiempo de viaje del camino del rayo vertical PS

T= El periodo dominante

Para la misma profundidad y frecuencia teniendo relación Vp/Vs de 2, el radio de la zona de *Fresnel* PS es alrededor de 80% más pequeña que la zona el radio de la zona de *Fresnel* para onda PP.

6.2.2.4 Fold PS

Eaton, 1992 planteó la fórmula para obtener el cubrimiento de la onda PS:

$$F_{p-sv} = \frac{n}{(1 + \frac{V_p}{V_s})} \quad \text{Ecuación (10)}$$

6.2.4 Tipos de geometrías de adquisición:

Por geometría de adquisición se entiende esencialmente la relación que existe entre el *salvo*¹⁴ y el *patch* de registro, es decir, lo que con frecuencia se llama el *template*. La geometría es importante, porque de ella dependen las características geofísicas del diseño y su grado de cumplimiento de requisitos impuestos por el procesamiento

Existen diversos tipos de geometrías, dentro de las principales encontramos:

6.2.4.1 Geometría Ortogonal

En este tipo de geometría las líneas de fuente y receptor se encuentran perpendiculares entre sí (Figura 11). Esta geometría es particularmente fácil de aplicar y de registrar en el terreno. Dependiendo del espaciamiento de las líneas de receptoras, el *aspect ratio*¹⁵ puede variar de 0.6 a 1. Registros con *aspect ratio* menores a 0.5 son considerados como *narrow azimuth* e indican que solo se registrara información de algunas direcciones, mientras que un *patch* con *aspect ratio* mayor a 0.5 son *wide azimuth* y permiten registrar información en todas las direcciones de azimut (Cordsen,2002). Una de las principales ventajas es que los

¹⁴ Salvo: Grupo de puntos de tiro que se registran con un mismo *patch*.

¹⁵ *Aspect ratio*: Es la proporción entre el máximo *offset in-line* y el máximo *offset x-line*. Este tipo de programa determina el tipo de programa sísmico.

datos con azimuth narrow pueden ser procesados y analizados como líneas sísmicas 2D y la principal desventaja largos Xmin (Cordsen et al., 2000)

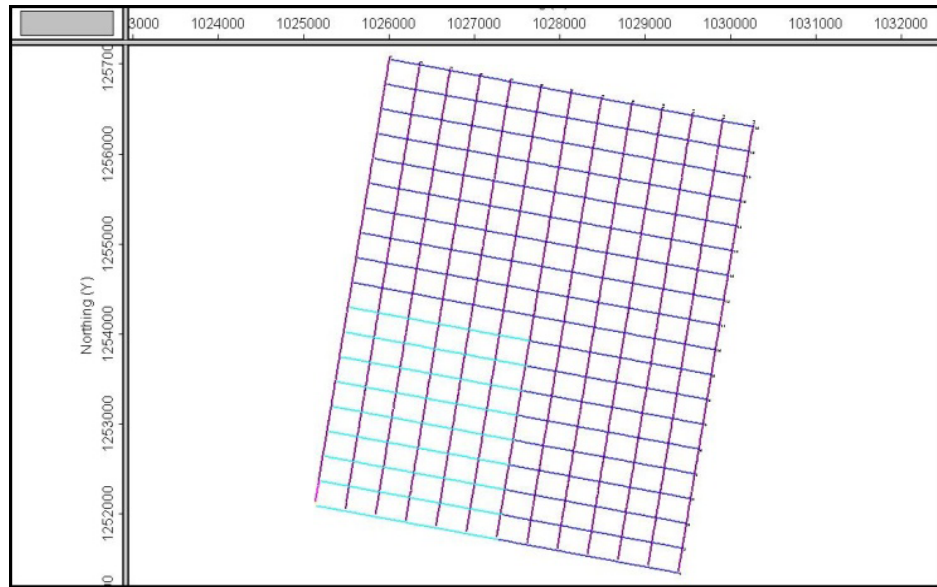


Figura 11. Geometría Ortogonal.

6.2.4.2 Geometría Aleatoria

La regularidad en los diseños frecuentemente deteriora la distribución de *offsets* y azimuth, al mismo tiempo favorecen la adquisición de artefactos entre los más conocidos la huella del diseño (Cordsen, 1999), pequeñas distancias entre líneas de disparo y receptores podrían ayudar a disminuir este efecto, pero los costos en adquirir este tipo de geometrías se incrementarían altamente. Para solucionar estos inconvenientes (Cordsen, 1999) propuso la geometría aleatoria (Figura 12) como una modificación de la geometría ortogonal. La principal ventaja de la aleatoriedad es proporcionar mejor distribución de *offsets* y azimuth y atenuación de patrones de adquisición.

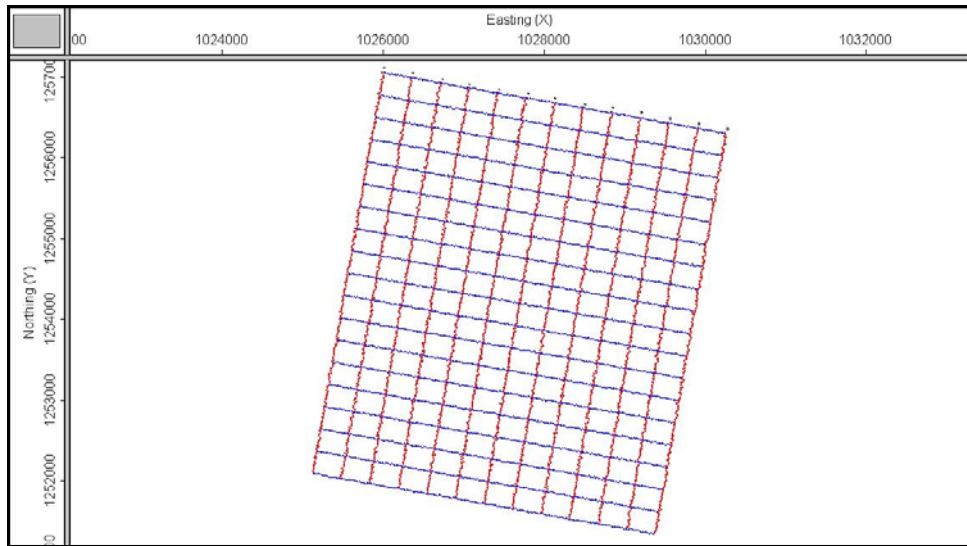


Figura 12. Geometría Aleatoria.

6.2.4.3 Geometría Diagonal “Slant-Slash”

Similar a la geometría ortogonal en cuanto a que las líneas de receptores son continuas, pero se diferencia en el ángulo que estas hacen con las líneas de disparos (Figura 13). Esta flexibilidad en la escogencia del ángulo, es lo que hace este diseño ventajoso. En esta geometría los ángulos más empleados son dos:

1. 26.7 grados (distancia vertical el doble de la horizontal), bins rectangulares en los que el intervalo de disparo es el doble que el intervalo de grupo.
2. a 45 grados (distancia vertical igual a la horizontal), bins cuadrados. Es aplicable a todas las áreas, la principal ventaja es mejor cobertura en *offsets* en general ideal para estudios de AVO.

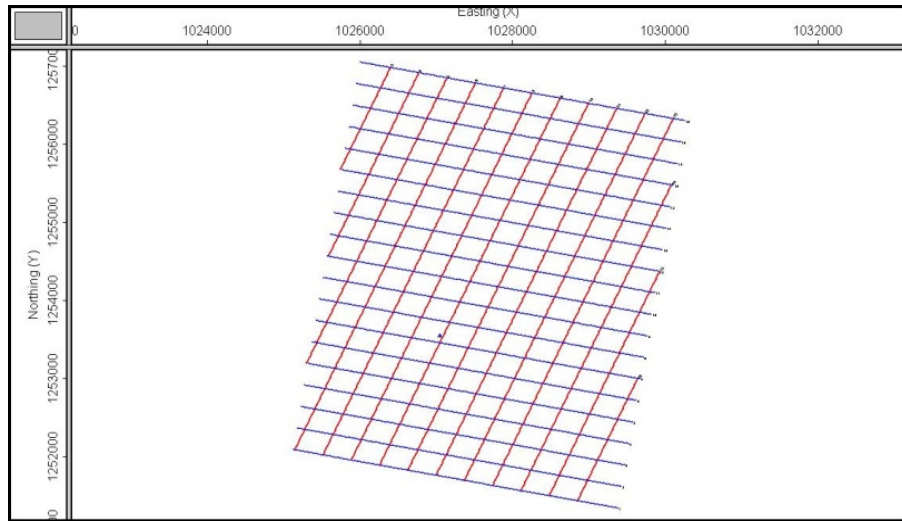


Figura 13. Geometría Diagonal.

6.3 Footprint

La adquisición sísmica 3D consiste en obtener una grilla regular 3-D x ; h ; μ (punto medio, *offset* y azimuth). Sin embargo, por la presencia de obstáculos, los puntos medios son distribuidos en forma irregular en las direcciones de *offset* (Figura 14) y azimuth, donde las trazas con diferente *offset* son orientadas en varias direcciones y varían de *bin* en *bin*

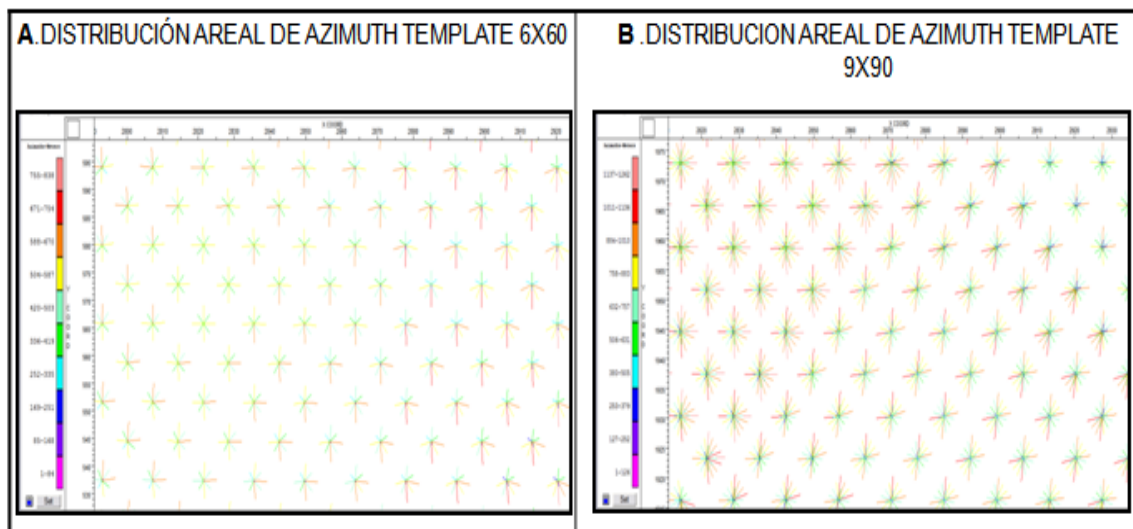


Figura 14. Ejemplo de distribución de azimuth para diferentes tamaños de *bin* (Duarte, 2008).

En programas sísmicos terrestres, las dificultades de acceso y los obstáculos son los responsables del muestreo irregular y la adquisición de artefactos. El resultado de estas irregularidades en la geometría es que el *footprint* sea adquirido y observado en el set de datos. Este efecto es amplificado cuando aplicamos DMO o migración preapilado 3D (Gesbert, 2002).

Varios autores han implementado e investigado métodos para atenuar o eliminar *footprint* tanto en la adquisición como en el procesamiento dentro de los cuales están: Magrave et al., 2007 modeló el *footprint* en datos sintéticos por medio de procesos exhaustivos y decimación con el objetivo de identificar qué tipos de *footprint* se podrían presentar. Gesbert (2002) ha declarado mecanismo de cómo la migración en profundidad Pre apilado 3D genera *footprint* y da una solución de cómo remover el *footprint* por remigración de los datos. Schuster y Liu (2001) el cual revela que el ruido de la adquisición *footprint* es proporcional a la transformada de Fourier de las fuentes y en función de muestreo de los geófonos, propone métodos de arreglo de adquisición para remover los *footprint*. Al-Bannagi (2005) propuso una solución SVD truncada que puede suprimir los *footprint* en datos sísmicos 3D posapilado. Falconer (2008) propone un filtro por número de onda $K_x K_y$ para reducir el *footprint*. Marfur et al., 1998 suprimió el *footprint* de los atributos sísmicos por un filtro de pendiente 3D, el también recomendó llevar este filtro de pendiente sobre los datos sísmicos Preapilado.

6.3.1 Definición

Las geometrías regulares como la ortogonal tienen la ventaja de que la adquisición en general se lleva a cabo de manera sencilla y ágil, pero tienen el inconveniente de que imprimen en los datos una huella indeseable en el patrón de disparos y receptores (Figura 15). Estas huellas son invisibles en ocasiones en diagramas de tiempo constante en el volumen procesado y son un peligro potencial que puede afectar la interpretación.

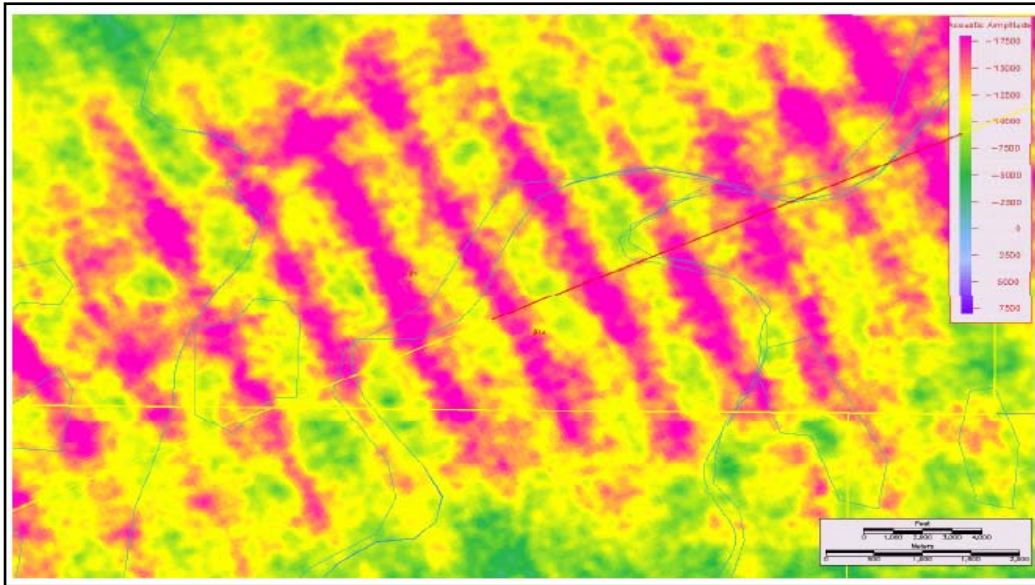


Figura 15. Ejemplo de adquisición de *Footprint* (Cooper et al., 2007).

6.3.2 Adquisición de *footprint*

La adquisición *footprint* puede deberse a una variedad de causas tales como:

- Cambios en la relación señal-ruido causado por variaciones en el cubrimiento.
- Ruido lineal apilado en diferentes formas: debido a variaciones en la distribución de offset.
- Energía de múltiples remantes después de apilar, debidas a variaciones en la distribución de offset o azimut.
- Fallas del DMO para crear interferencia constructiva, debida a la pérdida de “offset” de algunos *bins*.
- Ruido retro dispersado combinado en diferentes formas en las vecindades del *bin* como un resultado de variaciones en la distribución de *offset* y azimut.

6.3.3 Métodos para la reducción del *footprint*

Existen tres técnicas principales utilizadas para reducir el efecto de la huella del diseño (Cordsen et al., 2000).

- (1) Geometrías de adquisición en las cuales se produzca la mínima variación de offset en las trazas de *bin* a *bin*.
- (2) Procesamiento preapilado el cual minimiza las diferencias de amplitud relacionadas en offset contra las trazas antes de ser apiladas.
- (3) Usando procesos post apilado tales como: filtro f_j/k , and Kx_jKy .

7. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

En esta investigación se seleccionaron cuatro parámetros del diseño sísmico; (1) modelo geológico, (2) parámetros de carga, (3) tamaño de *bin* y (4) geometría de adquisición, con el propósito de identificar como estos parámetros influyen en la calidad de la imagen.

Para el desarrollo de los objetivos se plantearon cuatro etapas:

7.1 Influencia del modelo geológico en los parámetros del diseño

7.1.1 Construcción de Modelos Geológicos y Geofísicos

El modelado sísmico permite obtener la respuesta del subsuelo ante una hipótesis geológica y un diseño de adquisición de datos. De esta manera es posible prever qué tan adecuado es la selección de los parámetros de campo, en particular en los casos en que la geología se aleja de las hipótesis relativamente simples del diseño.

En la etapa 1, se diseñaron tres modelos geológicos (A, B, C) con el propósito de analizar la influencia de estos en los diagramas de calidad (iluminación, distribución de offset, y cubrimiento) para una configuración de parámetros de diseño fija.

Los parámetros geológicos y geofísicos (Tabla 1), asignados en los tres modelos se tomaron en referencia a un estudio anterior realizado en la zona Duarte, (2008).

Las relaciones V_p/V_s asignadas a cada formación correspondieron a las valores determinados por Ecopetrol, 2009.

Tabla 1. Parámetros geofísicos Campo Tenerife, (Duarte, 2008).

Formación	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad ($kg.m^3$)	Profundidad (metros)
Real	2525	1158	2.21	260
Colorado	3271	1611	2.03	723
Mugrosa zona B	3678	1956	2.44	1488
Mugrosa zona C	3929	2207	2.49	1946
Esmeralda	3895	2151	2.47	2241
La Paz	3300	1571	2.40	2476

MODELO A: Corresponde al modelo geológico no deformado para el campo Tenerife, es decir; modelo de capas planas (Figura 16).

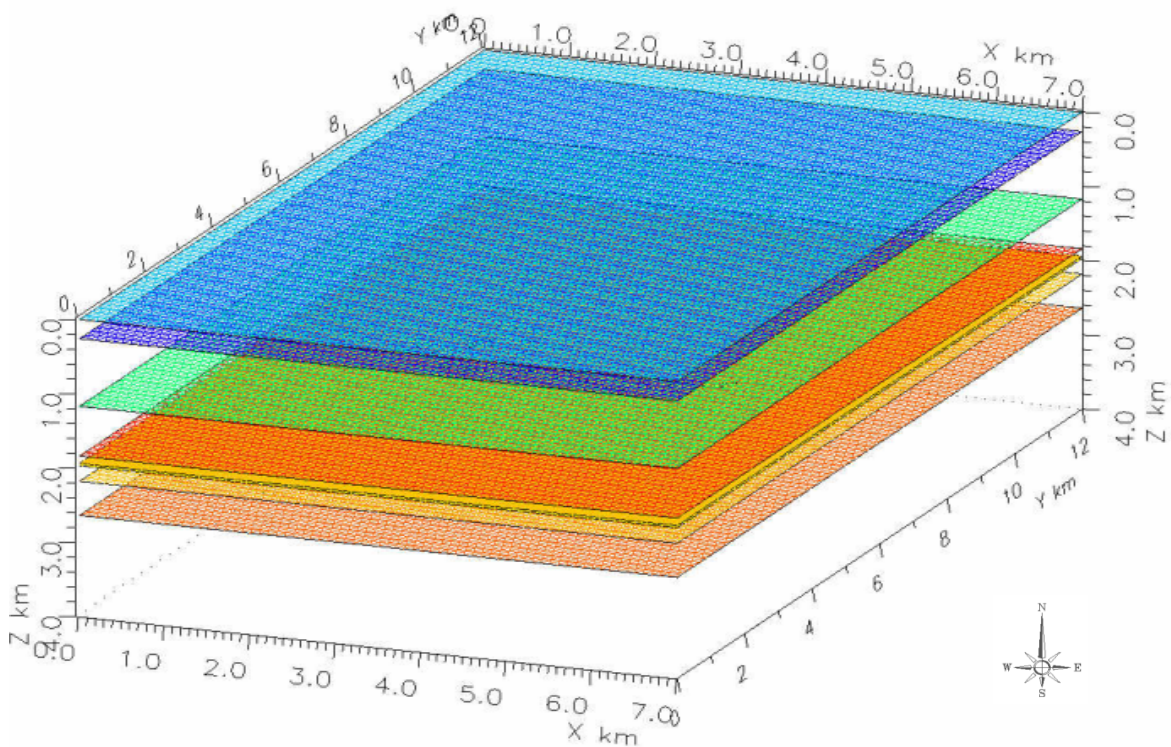


Figura 16. Modelo A Vista frontal.

MODELO B:

Fue modelado usando como referencia la interpretación de un conjunto de líneas sísmicas 2D del área. (Sandoval, 2009).

Básicamente el modelo B es atribuido a un pliegue Anticlinal ligeramente asimétrico con dirección preferencial Este-Oeste. La estructura está delimitada en el flanco Este por fallamiento inverso (Falla Tenerife_1) y afectando las Formaciones Esmeraldas, Mugrosa zona C y Mugrosa zona B (Figura 17).

Además, las líneas sísmicas 2D de rumbo interpretadas mostraron fallas normales (Fallas 1370_3 y 1370_4) asociadas a la componente extensiva que actúa en dirección opuesta a la dirección principal de esfuerzos que genera la estructura anticlinal de interés (Sandoval, 2009).

MODELO C:

Diseñado en referencia al volumen sísmico 3D interpretado para el Campo Tenerife (Sandoval, 2010).

La interpretación del volumen sísmico 3D del Campo Tenerife estaba disponible solo en tiempo (Sandoval, 2010), por lo que fue necesario realizar la conversión tiempo-profundidad. Esta conversión fue realizada por medio del campo de velocidad PSTM, las cuales corresponden a velocidades rms del Campo Tenerife (Figura 18). Por razones de confidencialidad no se dan detalles del modelo estructural C.

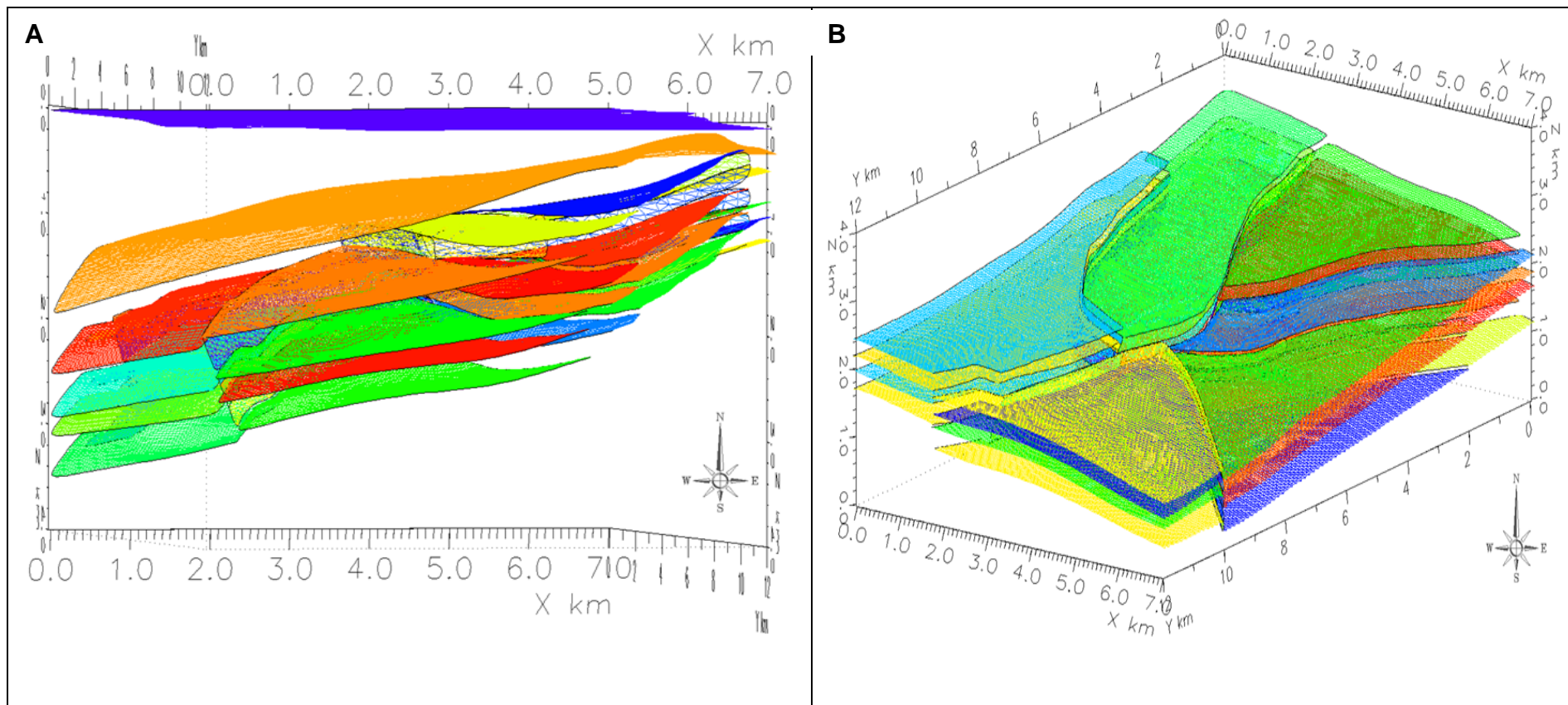


Figura 17. Modelo B. A). Vista Frontal. B). Vista Superior.

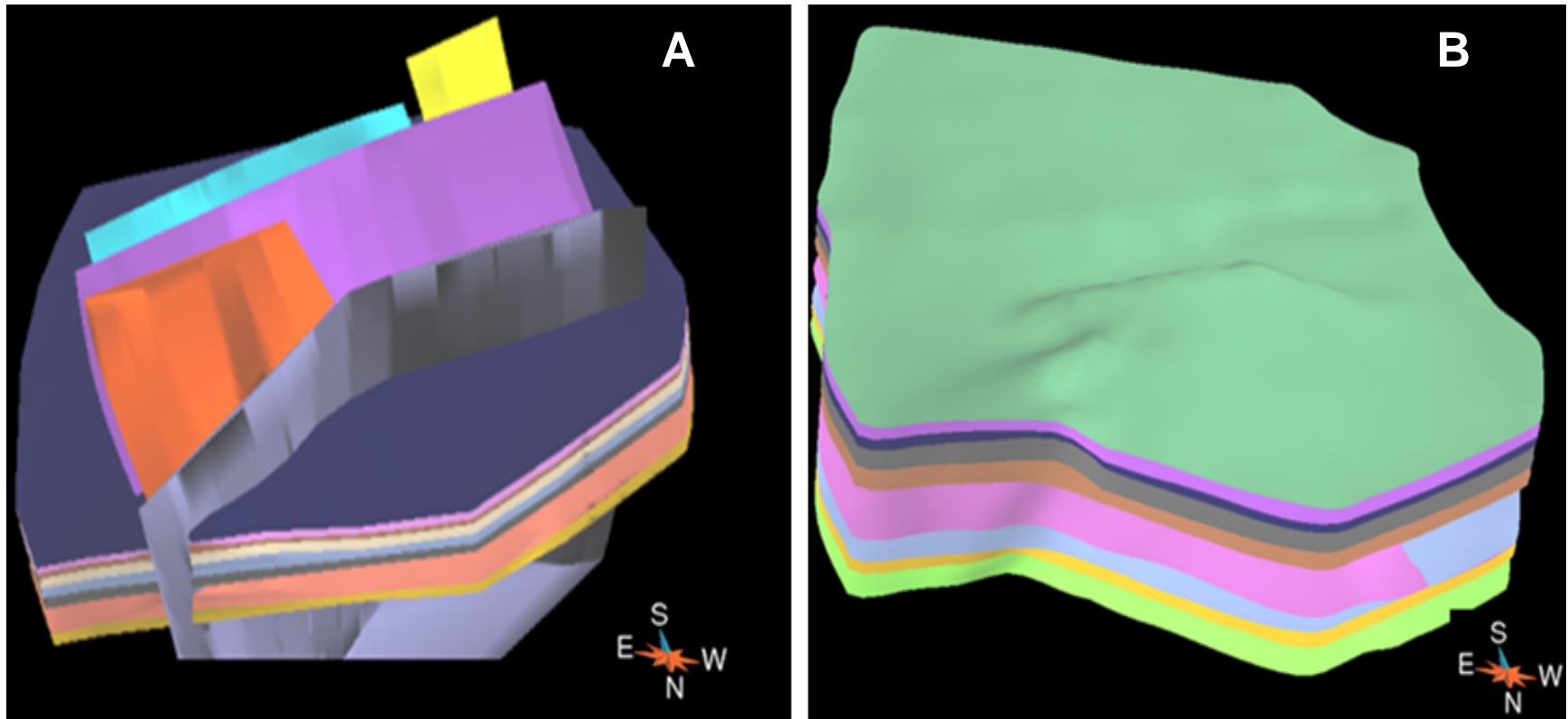


Figura 18. Modelo C. **A).** Vista superior modelo con fallas. **B).** Estructura contorno.

Una de las principales diferencias estructurales en los dos modelos “B y C”; es que modelo B presenta una estructura anticlinal en el centro del modelo de dimensiones aproximadamente el doble que el modelo C, la ubicación de la estructura anticlinal en el modelo C se interpretó más hacia la parte Norte y no en el centro.

La falla principal interpretada en el modelo B atraviesa todo el campo Tenerife contrario al modelo C en el que se identificó dos fallas inversas principales en el sector Norte del modelo las cuales compartimentalizan el yacimiento.

7.1.2 Simulación de la adquisición sísmica: Onda PP-PS

El área a iluminar correspondió a 4.3 km en la dirección *inline*¹⁶ y 5.04 kilómetros en la dirección *xline*¹⁷. Los principales obstáculos presentes en el área corresponden a La ciénaga del Opón y el río Opón.



Figura 19. Imagen satelital Campo Tenerife (Modificada de Google Earth).

¹⁶ Dirección *Inline*: dirección paralela a las líneas de receptores.

¹⁷ Dirección *xline*: dirección perpendicular a las líneas de receptores.

Los parámetros de diseño empleados en los tres modelos correspondieron al diseño *postplot*, el cual involucró los principales obstáculos de la zona (Guevara 2010) de la sísmica 3D3C (Tabla 2).

Tabla 2. Parámetros de adquisición sísmica Tenerife 3D3C (Guevara, 2010).

Parámetros de diseño Programa Sísmico Tenerife 3D-3C	
Tamaño de <i>bin</i>	10x10
Distancia entre receptoras	20m
Distancia entre fuentes	20m
Número de líneas de fuentes	13
Número de líneas de receptoras	18
Distancia entre líneas receptoras	318
Distancia entre líneas de fuente	216
Densidad de fuentes por km	463
Densidad de receptores por km	314
Geometría de <i>patch</i> :	16 x 216
Aspect ratio	0.964
<i>Fold in-line</i>	6
<i>Fold Crosline</i>	8
Relación Vp/Vs mugrosa C	1.78

Para los tres modelos A,B,C, se simuló ambos tipos de ondas PP y PS. La iluminación se realizó en la profundidad del objetivo Mugrosa zona C a 1950 metros.

La Figura 20 ilustra los diagramas de iluminación obtenidos para ambos tipos de ondas PP y PS en el modelo A. Por razones comparativas el máximo cubrimiento empleado en ambos diagramas PP-PS correspondió a 48.

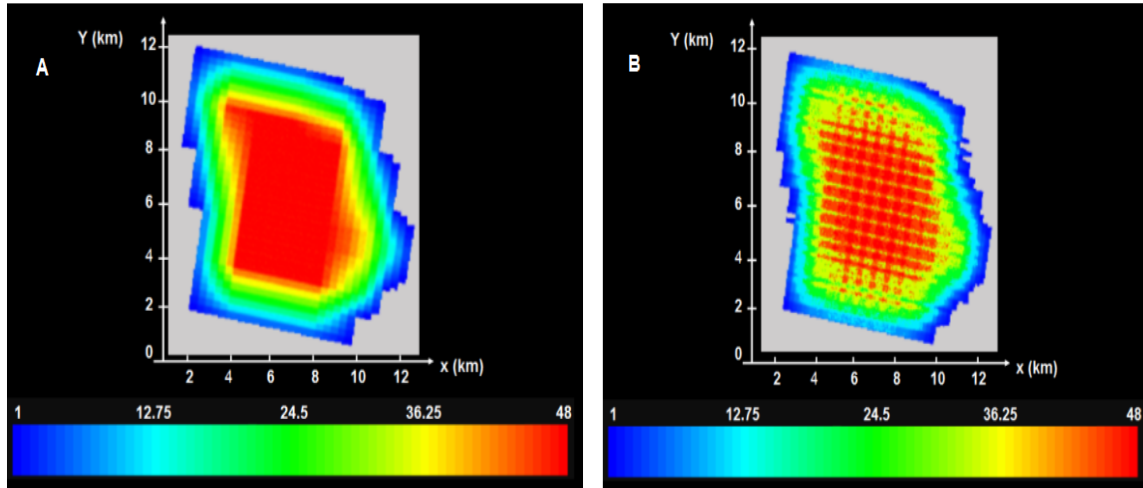


Figura 20. Iluminación Modelo A, **A).** Cubrimiento PP, **B).** Cubrimiento PS

En la figura 20.A se observa que la distribución del cubrimiento en la onda PP es homogénea contrario a la distribución de cubrimiento PS (Figura 20.B), en la cual se distinguen dos tipos de patrones; el primero en el sentido de la línea del receptor y el segundo en la dirección de la línea de fuente, este tipo de patrones en la distribución de cubrimiento se le conoce como huella del diseño.

Es común que la huella del diseño sea adquirida más fácilmente en un modelo de capas planas para la onda PS debido a que las simetrías puras tienden a crear variaciones sistemáticas del cubrimiento (Figura 20B), asociado a la asimetría de la trayectoria del rayo de la onda PS (Tessmer y Behle, 1988).

Comparando el modelo A y B en cuanto a iluminación se identifica que en el modelo A, modelo de capas planas (Figura 21B) todos los rayos están siendo recibidos por la malla de registro, pero en el modelo B (Figura 22B) los rayos divergen y no son registrados, debido al buzamiento de las fallas. Razón por la cual el sector 2, (Figura 23) se obtuvo baja iluminación.

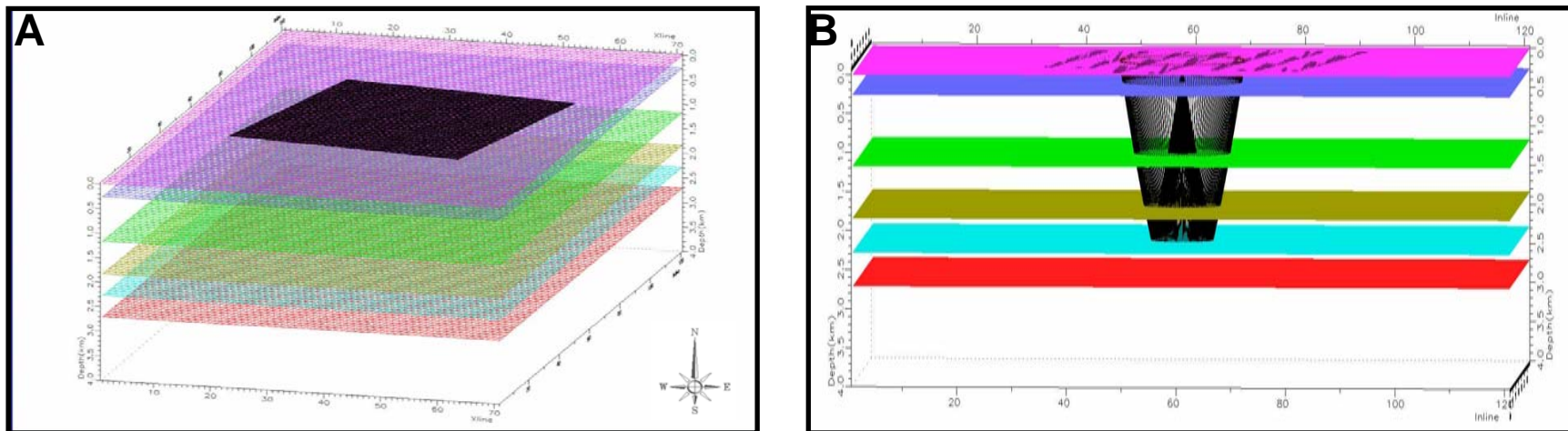


Figura 21. Modelo de Capas Planas **A).** Geometría modelo. **B).** Trazado de rayos en horizontes planos.

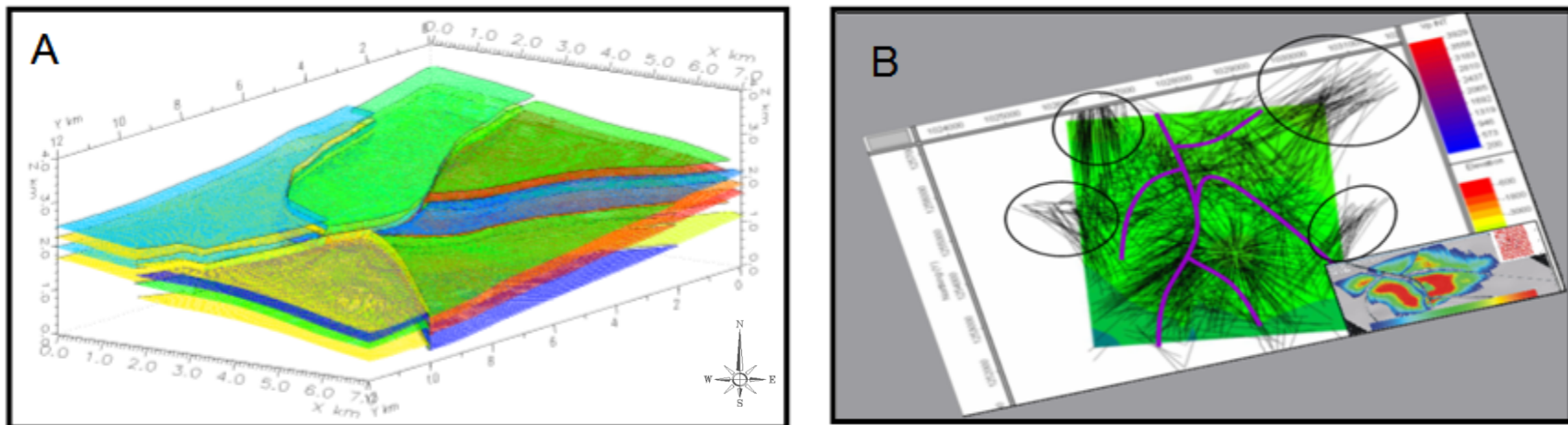


Figura 22. **A).** Modelo Estructural "Modelo B". **B).** Trazado de rayos modelo B.

En la Figura 23 se observan los diagramas de cubrimiento para los dos tipos de ondas PP-PS en el modelo B.

Los sectores 1-3 de la Figura 23B, simbolizan las regiones en las cuales el cubrimiento fue inferior (35 *fold*) y el sector (4) donde existió mayor iluminación 48 *fold*, en este último sector la iluminación corresponde a 48 tanto en la onda PP como PS.

En la Zona Norte, (Sectores 1,2) el cubrimiento para la onda PP correspondió a 36 y 24 para la onda PS.

Similar al modelo A (Figura 20B), la huella del diseño es observada, pero en este caso solo en la dirección de las líneas receptoras (Figura 23B).

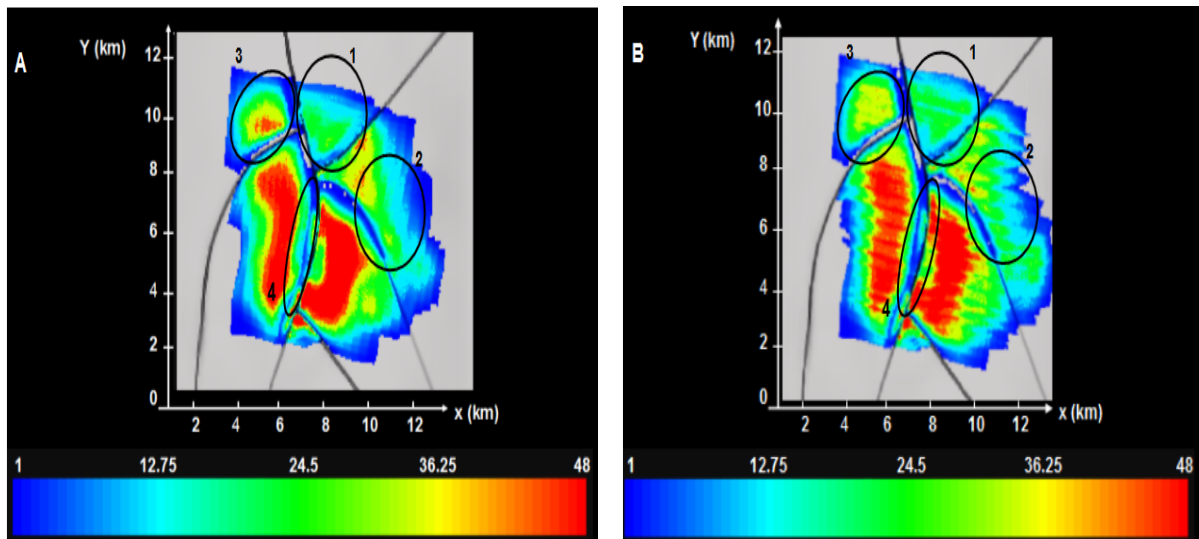


Figura 23. Cubrimiento Modelo B. **A).** Onda PP, **B).** Onda convertida

En la figura (23B) se identifica que en la Zona Sur del Modelo (Sector 4) el efecto de la huella del diseño es marcado en la dirección de las líneas de receptor, contrario a la zona Norte (Sector 1) en la cual este efecto se observa disminuido o atenuado.

La iluminación baja en algunos sectores del modelo B, se asocia a la falla inversa que atraviesa todo el Campo Tenerife. Por ejemplo, en la zona Norte

“sector 1” el ángulo de buzamiento de la falla es mayor que en la Zona Sur “sector 4” (Sandoval, 2010).

En la Figura 24 se observa los diagramas de cubrimiento para los dos tipos de ondas PP-PS para el modelo C. Los números (1,2) corresponden a los sectores en los cuales la iluminación fue menor.

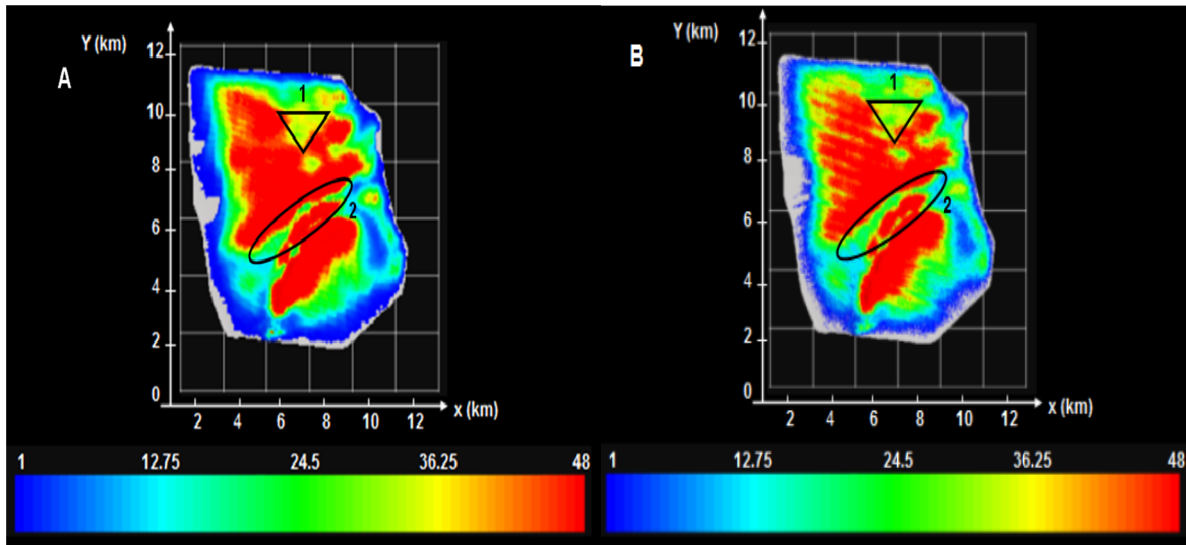


Figura 24. Cubrimiento Modelo C, **A).** Onda P, **B).** Onda convertida.

En el modelo B (Figura 23B) la huella de la geometría es observada solo en la dirección de las líneas receptoras, similar en la Figura 24B.

La Zona Norte del Campo Tenerife, corresponde a la zona que presenta mayor buzamiento, lo cual resulta interesante, porque como se ha observado en los diagrama de cubrimiento PS del modelo B y C la huella del diseño en la dirección de los receptores se presenta disminuido en zonas donde la estructura presenta mayor buzamiento Figura 23B (sector 1) y Figura 24B (sector 2).

7.1.3 Generación de diagramas de control de calidad del diseño

En esta fase, se calcularon los diagramas de calidad como: cubrimiento, distribución de *offset* y azimut para los tres modelos

En la figura 25 se observa el histograma correspondiente al valor del cubrimiento versus el número de *bin*. El máximo valor obtenido es 48 para las tres distribuciones de cubrimiento.

En la figura 25A se observó la distribución del cubrimiento para el modelo A, en el cual se distinguieron tres modas. La primera de 6 a 10, la segunda de 12 a 18 y la tercera en 48.

En las figura 25B y 25C presentan la misma tendencia de distribución en el cubrimiento.

La Figura 26 representa el *Flowert Plot*¹⁸ para el modelo de capas planas y el modelo B. La escala de color indica la multiplicidad de la ocurrencia de los pares fuente-receptor en la distribución de *offsets* y azimut

En la Figura 26B se observó dos zonas de no iluminación en N10° y 40°, estas dos zonas coinciden con la dirección de las dos fallas principales que atraviesan el Campo Tenerife.

La Figura 27 se representa la distribución del cubrimiento en el dominio *Offset-azimut* para los modelos B y C. El modelo C (Figura 27B) presenta una zona de no iluminación principalmente a N-30°, pero en general, la iluminación en los diferentes azimut conservan un cubrimiento homogéneo.

¹⁸ *Flowert Plot*: Representa la distribución de cubrimiento en el dominio *Offset-azimut*.

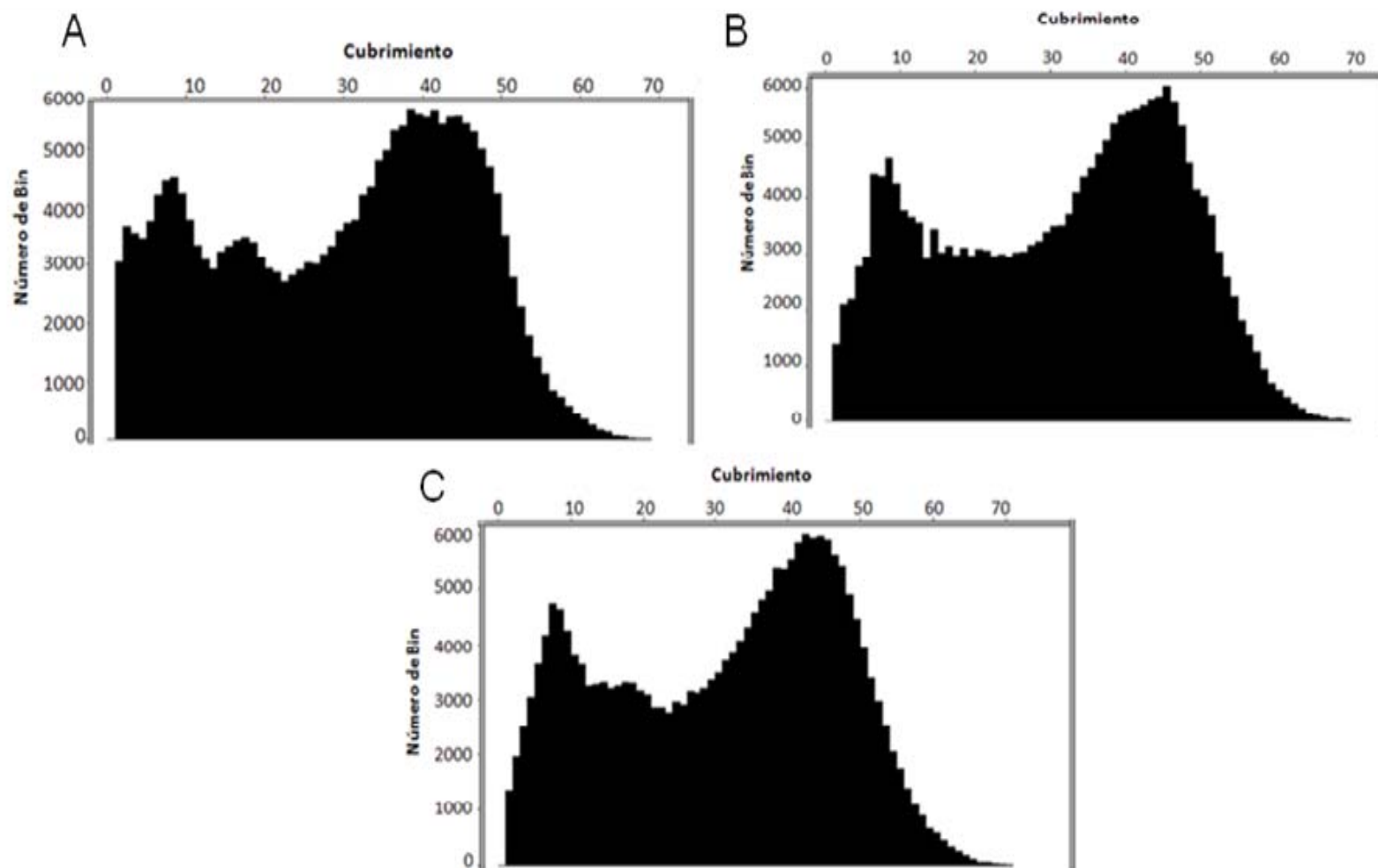


Figura 25. Distribución de cubrimiento. **A.** Modelo de capas planas. **B.** Modelado a partir de líneas 2D. **C.** Modelo C

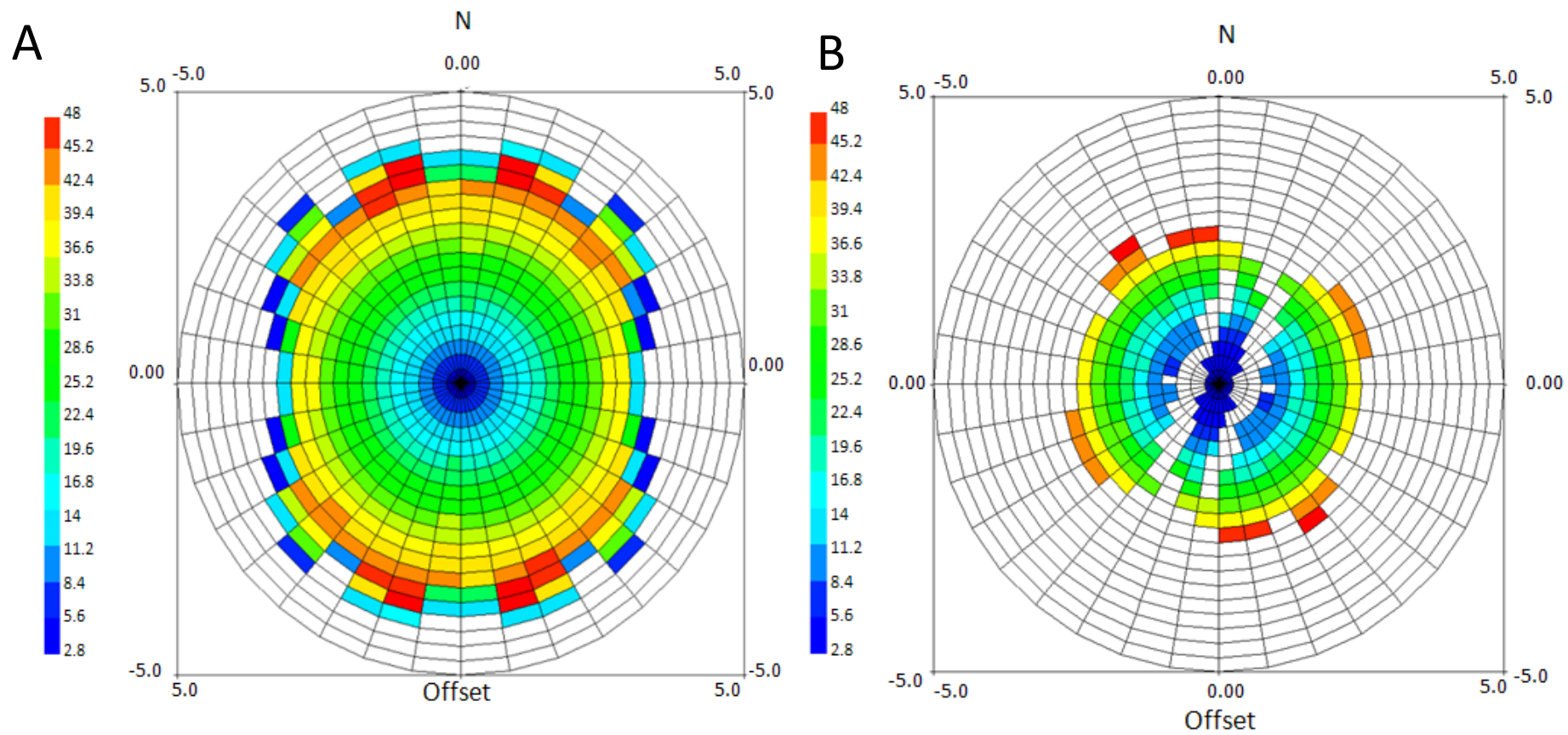
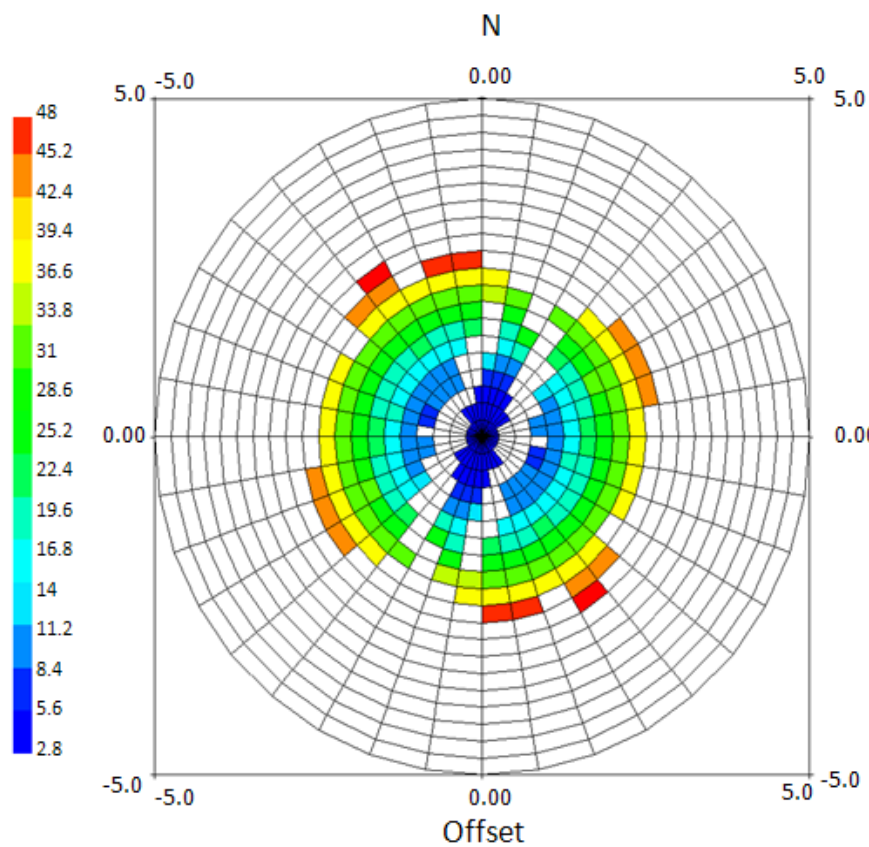


Figura 26. *Flower plot.* **A.** Modelo de Capas planas. **B.** Modelo B.

A



B

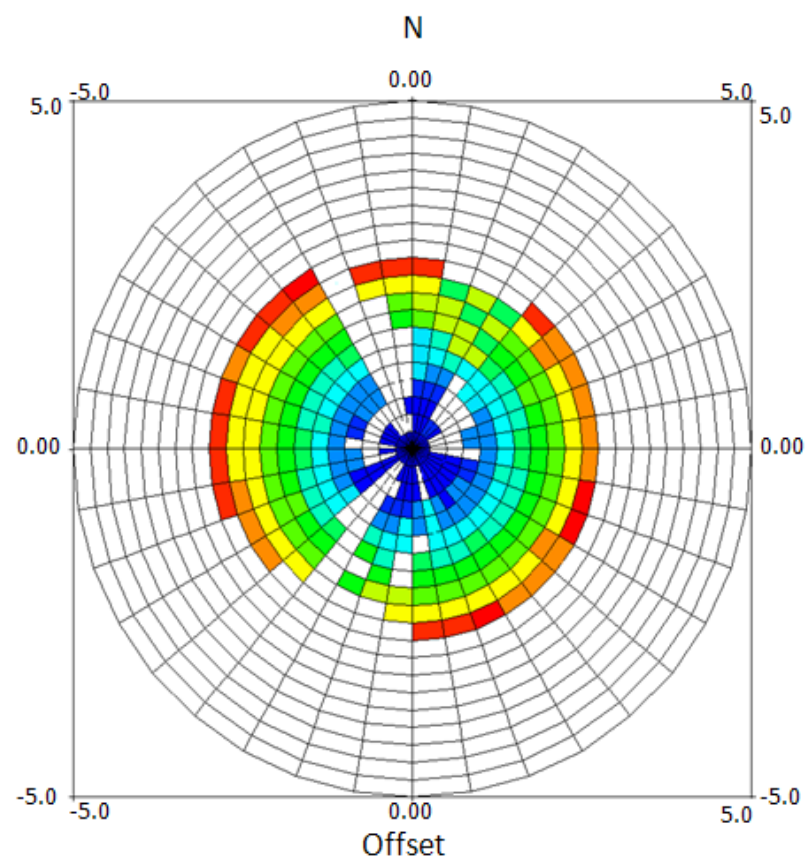


Figura 27. *Flower Plot*, **A.** Modelo B, **C.** Modelo C.

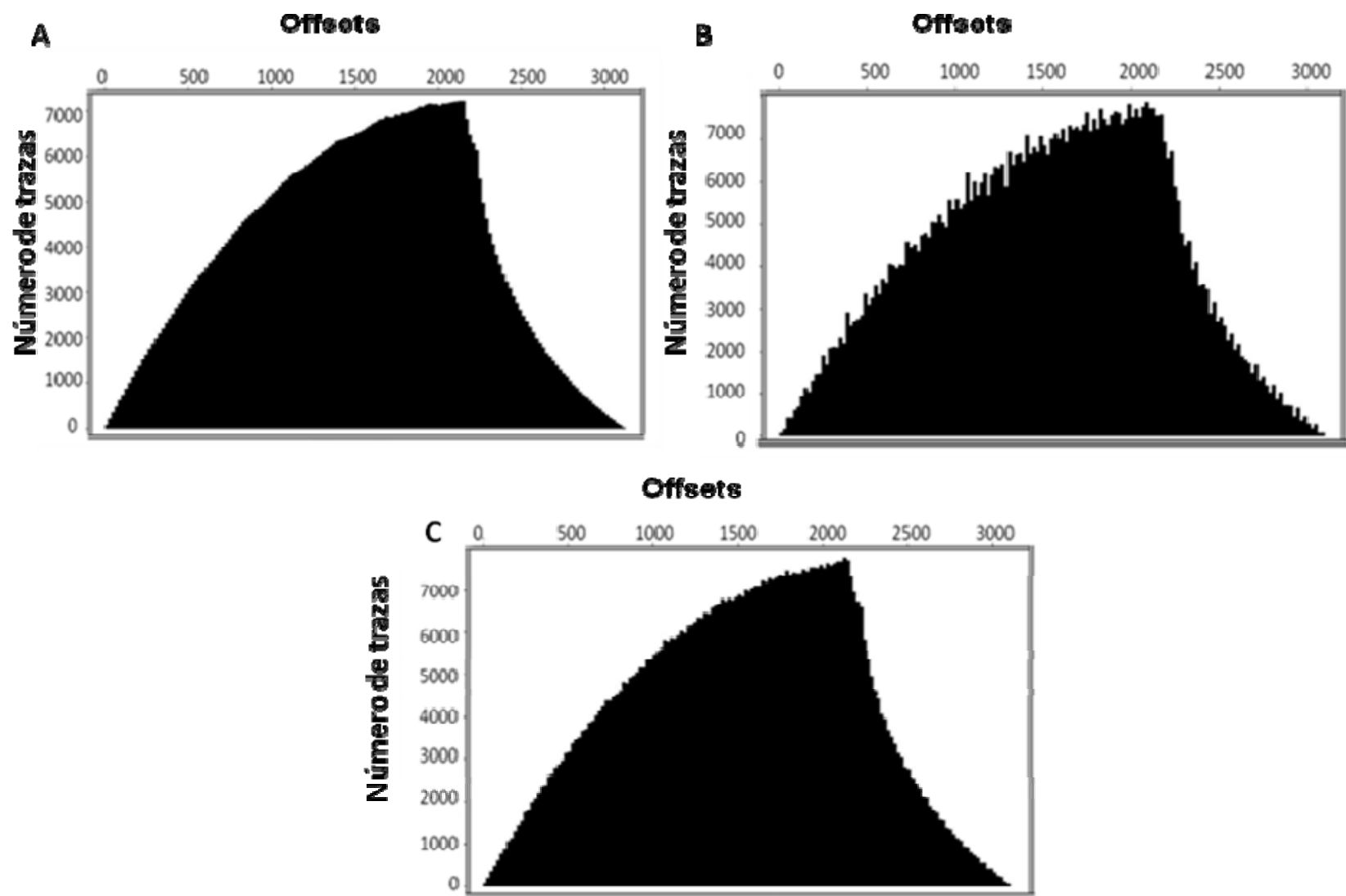


Figura 28. Distribución de offset. **A.** Modelo A, **B.** Modelo B, **C.** Modelo C.

En general, las figuras 28A y 28B presentan similar distribución de las trazas para la profundidad objetivo de 1950.

En la figura (28.B) se observó, variaciones suaves en la distribución del número de trazas por *offsets*, esto puede relacionarse al fallamiento de la estructura en las formaciones geológicas más someras (Fm Real, Colorado y Mugrosa B).

Para el caso del Modelo C, el cual es deformado solo en la zona Norte del Campo Tenerife, estas variaciones en la distribución del número de trazas por *offsets* no son visibles.

En la figura 28 se observó, que la mayor cantidad de trazas “7000” estuvieron distribuidas en rango de *offset* de 1650 a 2050 metros, este rango de distribución de *offsets* corresponde al intervalo en el cual se encuentra la profundidad objetivo Mugrosa C.

En general, para los tres modelos se observó que presentan la misma tendencia en la distribución de *offset*, lo que significa que el diseño sísmico 3D3C, estaría iluminando el horizonte de interés a 1950m.

7.2 Influencia de los parámetros de carga en los registros sísmicos

El objetivo de este experimento consistió en analizar la influencia de los parámetros de carga a partir de cinco configuraciones de patrón y la respuesta sísmica de cada parámetro para los dos tipos de ondas PP y convertida.

Generalidades Línea Experimental

La línea sísmica utilizada corresponde a la Línea experimental 1 de longitud 90 km. Esta línea atravesó todo el proyecto sísmico con el objeto de caracterizar la zona de estudio (Figura 29), sobre esta línea se adquirieron cinco configuraciones de patrón (Tabla 3).

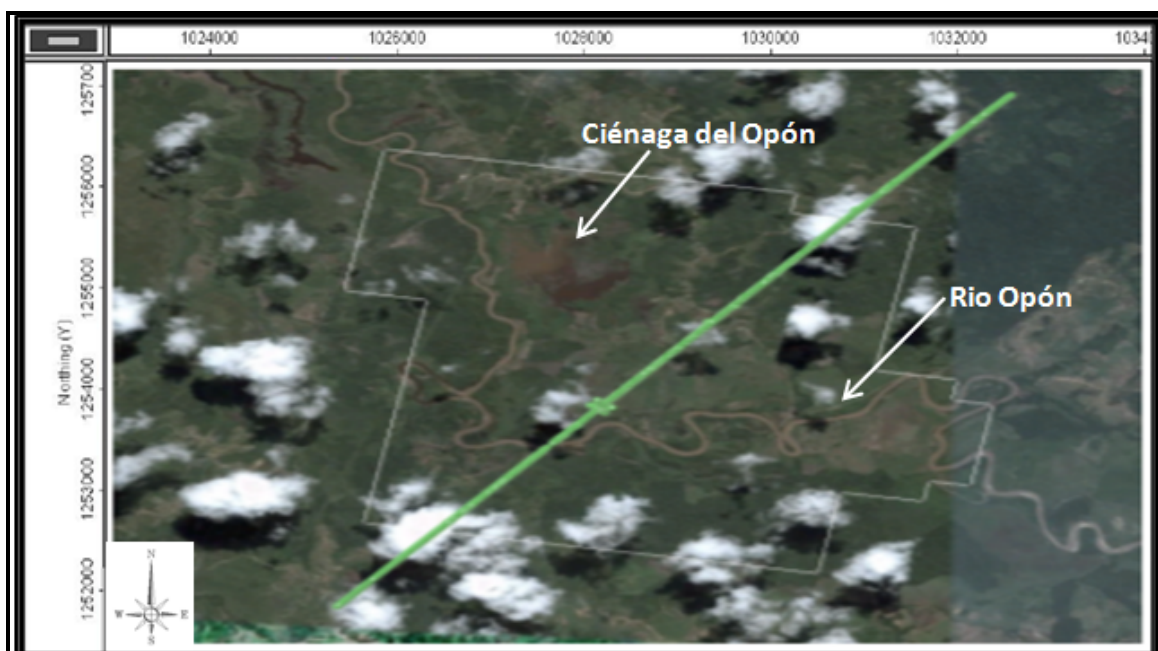


Figura 29. Imagen Satelital Campo Tenerife: Ubicación línea experimental (Modificado Google Earth).

Tabla 3. Configuraciones de parámetros de carga adquiridos en la línea experimental Tenerife 2D-3C, Campo Tenerife.

Configuración de Patrón	Tamaño de la Carga (gramos)	Profundidad de perforación (metros)	Fuente
A	2700	10	Sismigel
B	1800	15	Sismigel
C	360	15	Sismigel
D	4500	15	Sismigel
E	2700	20	Sismigel

El parámetro base en la línea experimental 1 correspondió a la configuración de patrón: 10 metros de profundidad y 2700 gramos “1x10x2700”

La adquisición se obtuvo de la siguiente forma, se disparó el patrón base y junto a él otra configuración de patrón: A-B, A-C, A-D y A-E de tal forma que se estaba iluminando el mismo punto pero con diferentes parámetros de carga, la razón de esto, es reducir una variable a la interpretación de los registros, la cual corresponde a la variación lateral de la geología.

En la figura 30, se observó las estadísticas de perforación y tamaño de carga para la línea experimental 1 Campo Tenerife 2D3C, El número total de pozos perforados en la línea experimental correspondió a 300.

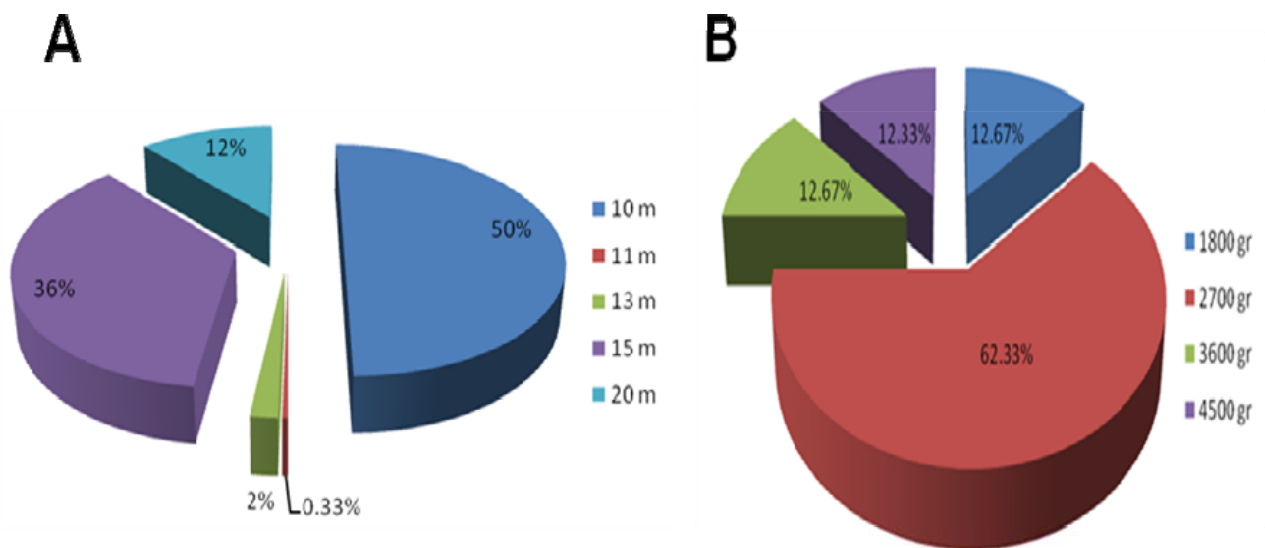


Figura 30. Diagrama que muestra la relación de la cantidad de pozos perforados en porcentaje en la línea experimental Tenerife 2D3C. **A.** Profundidad de perforación, **B.** Tamaño de carga.

En la Figura 30 A, se observó la relación de la cantidad de pozos perforados en porcentaje y los colores simbolizan las profundidades perforadas 10m, 11m, 13m, 15m y 20m. El total de pozos perforados son 300 y el parámetro base de

perforación correspondió a 10m de profundidad, equivalente en porcentaje al 50%.

La Figura 30 B muestra la relación de la cantidad de pozos perforados en porcentaje y los colores simbolizan el tamaño de carga empleada; 1800gr, 2700gr, 3600gr y 4500gr. El total de pozos perforados correspondió a 300, el parámetro base de perforación: 2700gr, equivalente en porcentaje al 62.33%.

7.2.1 Clasificación de la respuesta sísmica a partir de cinco configuraciones de Patrón

La línea experimental 1 de longitud de 90 km fue clasificada en tres zonas según la respuesta sísmica de 300 registros de disparos (Figura 31). Las zonas se denominaron: zona A, zona B y zona C. En lo que a la geología concierne, las zonas A y C corresponden a sedimentos de edad Terciaria y la zona 2 de edad Cuaternaria. Lo importante de resaltar es que la zona A y C corresponde a la misma unidad geológica pero analizando los registros sísmico presentan aparentemente respuestas diferentes?

Para la línea experimental 1 por inspección visual se identificaron tres sectores de comparación en los registros (Figura 32): (1) zona de *ground roll*, (2) reflectores someros y (3) *offset* lejanos.

En el sector (2), los reflectores someros, son más definidos en la zona C que en la zona A, B.

En el sector (1), el cono del *ground roll*, es más definido para la zona C, en la zona B este presenta más amplio.

Para los *offsets* lejanos (3) es posible distinguir con mayor facilidad los reflectores en la zona A y C que en la zona B (Figura 32).

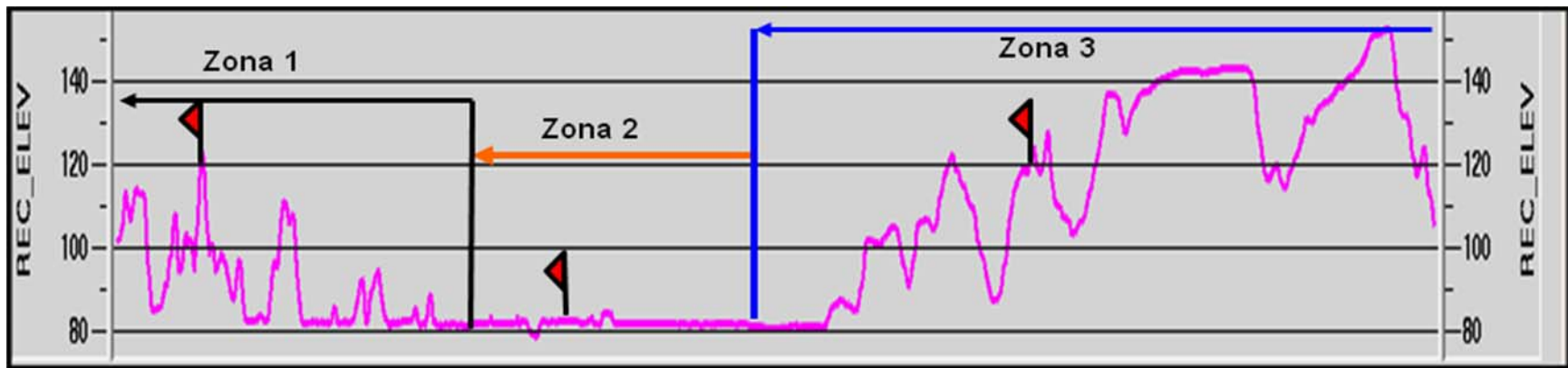


Figura 31. Topografía línea experimental simulada a partir de la elevación de los receptores.

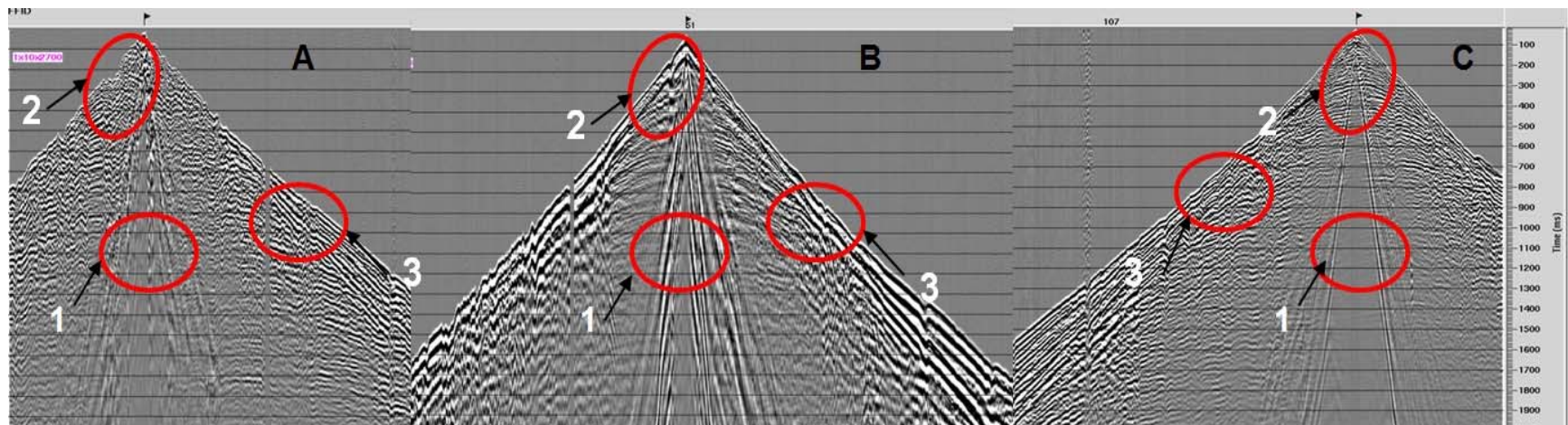


Figura 32. Respuesta sísmica configuración de patrón 1x10x2700 en tres zonas. **A, C** Terciario, **B.** Cuaternario.

7.2.2 Análisis de frecuencias en las diferentes configuraciones de patrón

En esta fase se comparó cada registro de disparo en el espectro de frecuencia con su respectiva pareja de la siguiente manera: A-B, C-D, E-F, G-H (Tabla 4). Con el objeto de interpretar qué parámetro de carga conserva mejor el contenido de frecuencia, y como es el decaimiento de la frecuencia para cada patrón de disparo.

Tabla 4. Parejas de patrón de comparación línea experimental 1.

Configuración de Patrón	vs	Configuración de Patrón
1x10x2700		1x15x1800
1x10x2700		1x15x3600
1x10x2700		1x15x4500
1x10x2700		1x20x2700

El sector en milisegundos analizado para el caso de la onda P correspondió al intervalo de 900 a 1300ms. Se escogió esta ventana de tiempo porque la Formación Objetivo “Mugrosa C” se encuentra en el programa sísmico a tiempos de 900ms y la Discordancia el Eoceno a 1100 ms aproximadamente.

En la Figura 33 se observa el espectro de frecuencia para cinco configuraciones de patrón para la zona 1 “Terciario” para la onda PP.

Comparando la Figuras 33.A y 33.B; el contenido de frecuencias en el intervalo de 10 a 40Hz presentan la misma tendencia para los dos tipos de patrón, pero el decaimiento de la frecuencia en el patrón 1x10x2700 es mayor en el intervalo de

60 a 80Hz que para la configuración de patrón 1x15x1800, el cual tiende a conservar el contenido de frecuencias de 60 a 80Hz.

La Figuras 33.C, 33.E, 36G se identificó que el patrón de 1x10x2700 conserva las frecuencias en un rango de 40-60Hz comparado con los patrones de 1x15x3600, 1x15x4500. 1x20x2700.

Para las Figuras 33.D y 33.F se observó que las frecuencias superiores a 60 Hz son conservadas, en relación a la Figuras 33.C y 33.E.

La Figura 34, representa el contenido de frecuencias en la zona 2 (Cuaternario) para las cinco configuraciones de patrón.

En la Figura 34 B, se observó dos modas en las cuales la frecuencia presenta su más alto valor: 10-20Hz y 40-60Hz para la configuración de patrón de 1x15x1800.

Se identifica en la Figura 34.A que el contenido de frecuencias decrece más rápido para configuraciones de patrón de mayor carga (Figura 34.B,D,F) excepto para la configuración de patrón de 1x20x2700 (Figura 34.H).

En la Figura 37.C se identifica dos valores máximos de frecuencia, el primero a 14 Hz y el segundo en 50 Hz.

Finalmente se identifica también que el decaimiento en la frecuencia es más rápido en la zona 2 que en la zona 1.

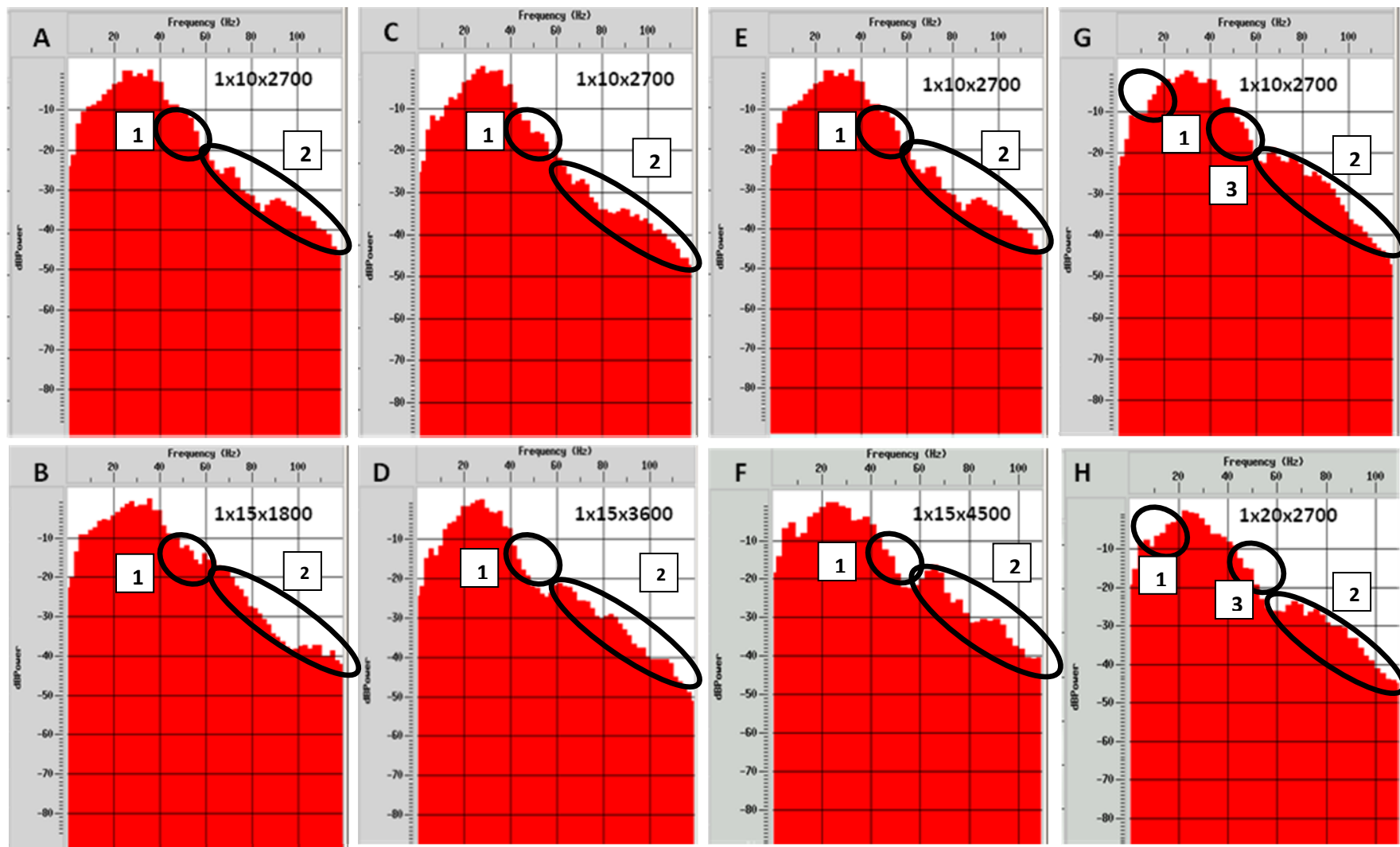


Figura 33. Contenido de frecuencias para cinco configuraciones de patrón Zona 1 "Terciario".

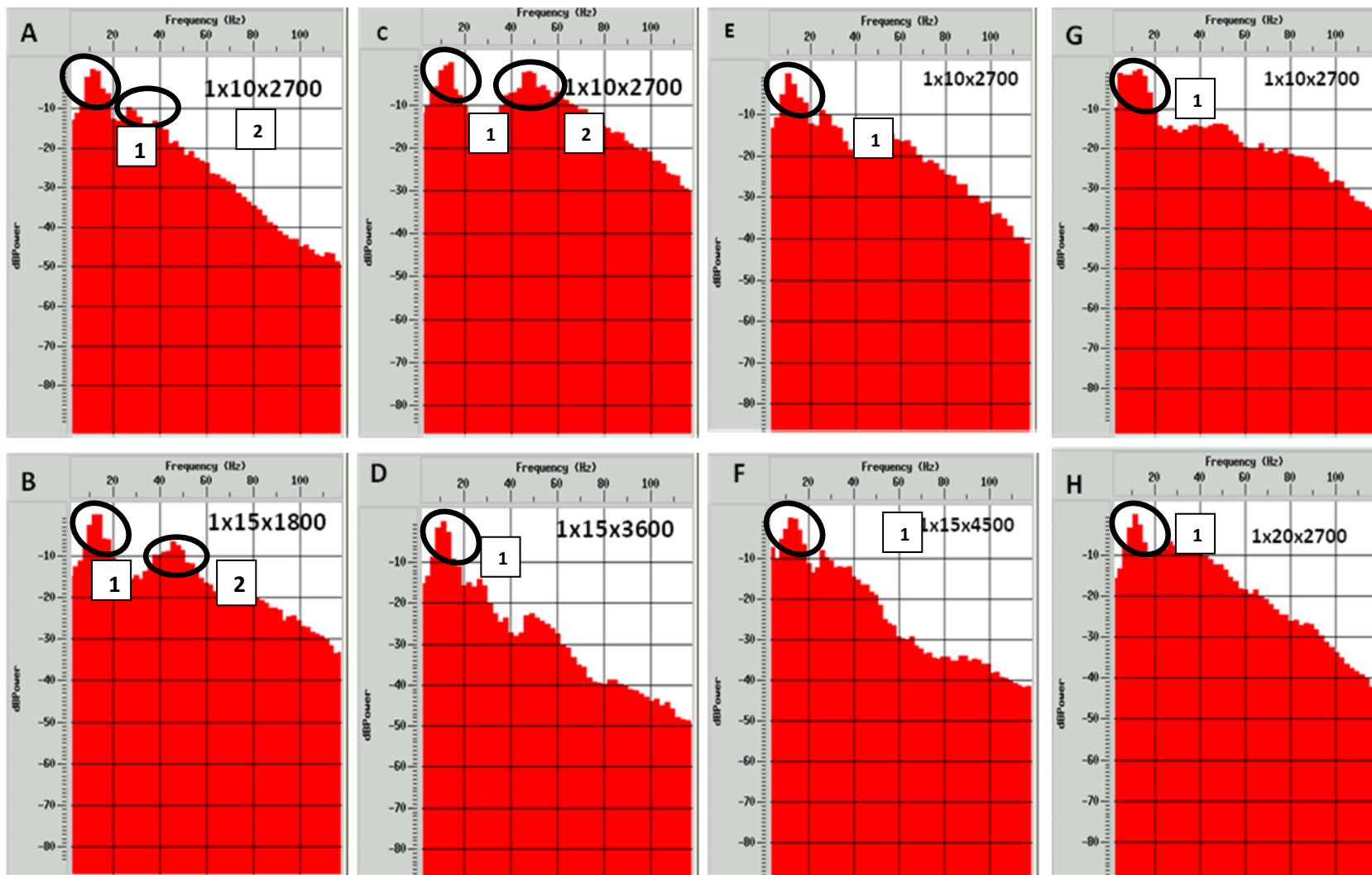


Figura 34. Contenido de frecuencias para cinco configuraciones de patrón Zona 2 Cuaternario

Para ambas configuraciones de patrón (Figura 34.C y 34.D) se obtuvo el máximo de frecuencia en 14Hz. La Figura 34C presentó realce del contenido de frecuencias en dos sectores; 14 Hz y 50 Hz aproximadamente.

Para la configuración de patrón 1x15x3600 se observó que el contenido de frecuencias decrece rápidamente en relación al contenido de frecuencias de la configuración de patrón de 1x10x2700 (Figura 34).

Las figuras 34.E y 34.F en el intervalo de frecuencias de 0-30Hz presentó distribución similar, pero, en el intervalo de 40-100Hz el contenido de frecuencias se conservó para la configuración de patrón 1x10x2700(Figura 34.E)

La configuración de patrón 1x10x2700 realza el contenido de frecuencias de 0-20 Hz (Figura 34.G) pero en el intervalo de 20-30 disminuye en relación con la configuración de patrón de 1x20x2700.

Para la zona B “Cuaternario” el parámetro de carga de 1x10x2700 conserva el contenido de frecuencias en un intervalo más amplio que todas las configuraciones de patrón, excepto por la configuración de patrón de 1x15x1800.

La configuración base (1x10x2700) en la zona 1 conserva las frecuencias en el intervalo de 0-40Hz contrario a la zona 2 en la cual solo se conservan en el intervalo de 0-20Hz .Excepto en un sector en el cual se observó dos picos máximos en este intervalo de frecuencias (Figura 34.C)

Analizando la zona 1 “Cuaternario” y zona 2 “Terciario” se evidencia que el decaimiento en la amplitud en el intervalo de 0-40Hz en la zona 2 es más fuerte que en la zona 1 (Figura 33 y 34).

En general la zona 1 “Terciario” conserva las frecuencias en un amplio rango de frecuencias, contrario a la zona 2 “Cuaternario” en la cual decrece más rápido el contenido de frecuencias

En la zona 1 (Figura 33) la configuración de patrón de 1x10x2700 y 1x15x18000 presenta distribución similar en el contenido de frecuencias, además se identificó

que para la configuración de patrón de 15 metros al aumentar la carga el espectro de frecuencia presenta similar distribución, por lo cual se puede concluir que en la zona 1 no es justificable aumentar el tamaño de carga.

En la zona 2 "Cuaternario" (Figura 34) se observa que las configuraciones de patrón 1x10x2700 y 1x15x1800 conservan el contenido de frecuencias en un intervalo amplio (Figura 34).

Para la zona de Cuaternario se evidencia que a medida que se aumenta el tamaño de carga el contenido de frecuencias decae más rápido, excepto para la configuración de patrón de 1x20x2700 (Figura 34), por lo que se puede pensar que una configuración de patrón óptima podría estar en el intervalo de 10-15-20 metros pero con un tamaño de carga de 2700 gramos.

7.2.3 Comparación cuantitativa y cualitativa registros de onda PP-PS

En esta fase se compararon los registros de disparo de onda PP con los registros de onda convertida para la misma configuración de patrón y zona geológica. La razón, es determinar qué configuración de patrón conserva mejor definición para el reflector objetivo.

Por ejemplo, en el registro FFID 52 la configuración de patrón 1x10x2700 se observa que en el registro de onda convertida se distingue más fácil ciertos reflectores someros que en la onda PP (Figura 35-B). El posible reflector de la discordancia del Eoceno (?) (identificado con el número 1) se observa más continuo en el registro de onda PS (Figura 35-B). El cono del *ground roll* (3) es más disperso en el registro de onda PP.

En la Figura 36, es posible distinguir los reflectores someros (2) para los dos tipos de ondas, pero en (1) en onda convertida, no es posible correlacionar este reflector debido a que el cono del *ground roll* (1) los enmascara.

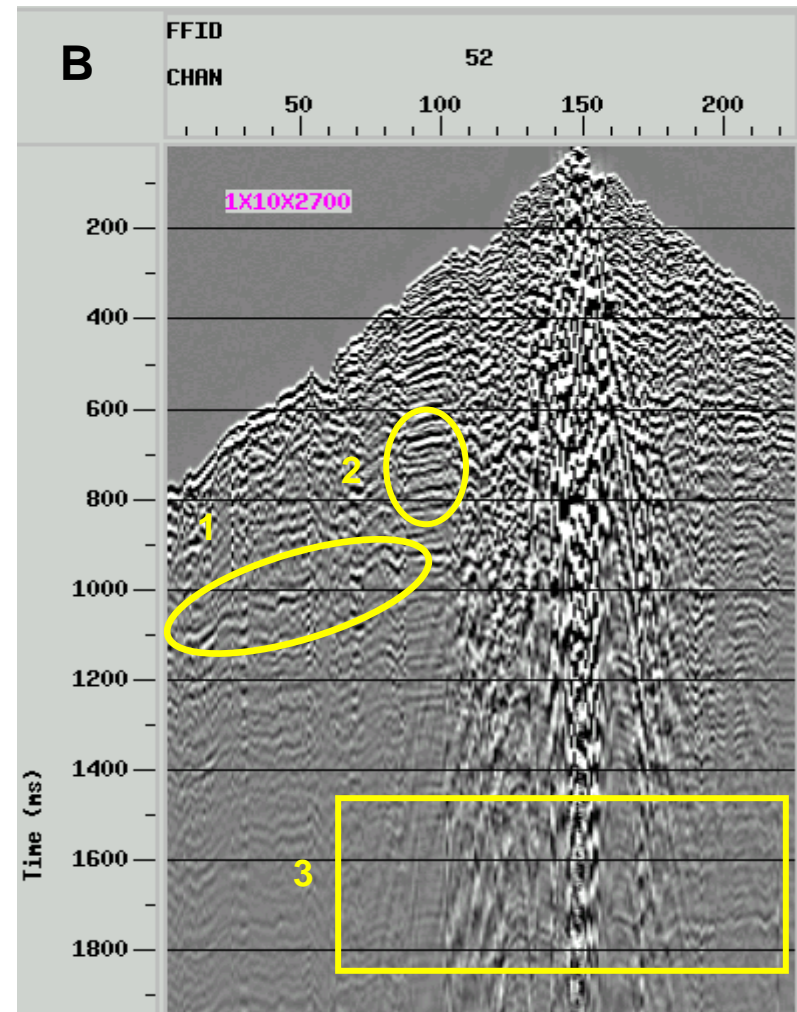
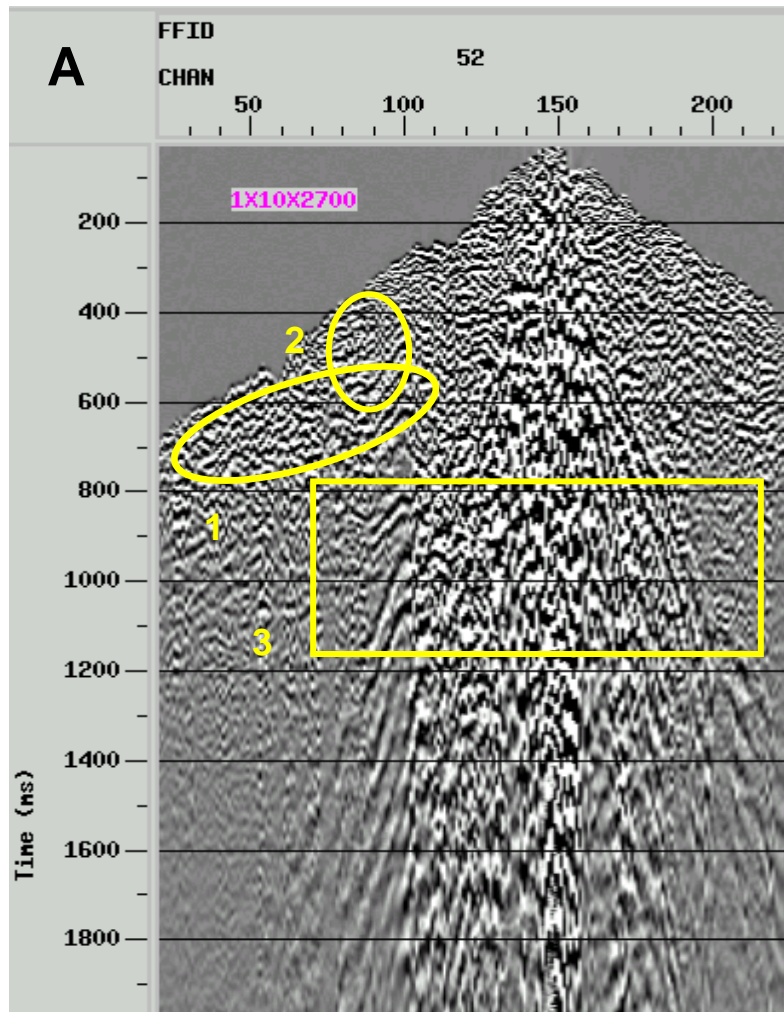


Figura 35. Registro de disparo onda PP y onda convertida para la configuración de patrón 1x10x2700, sector 1.

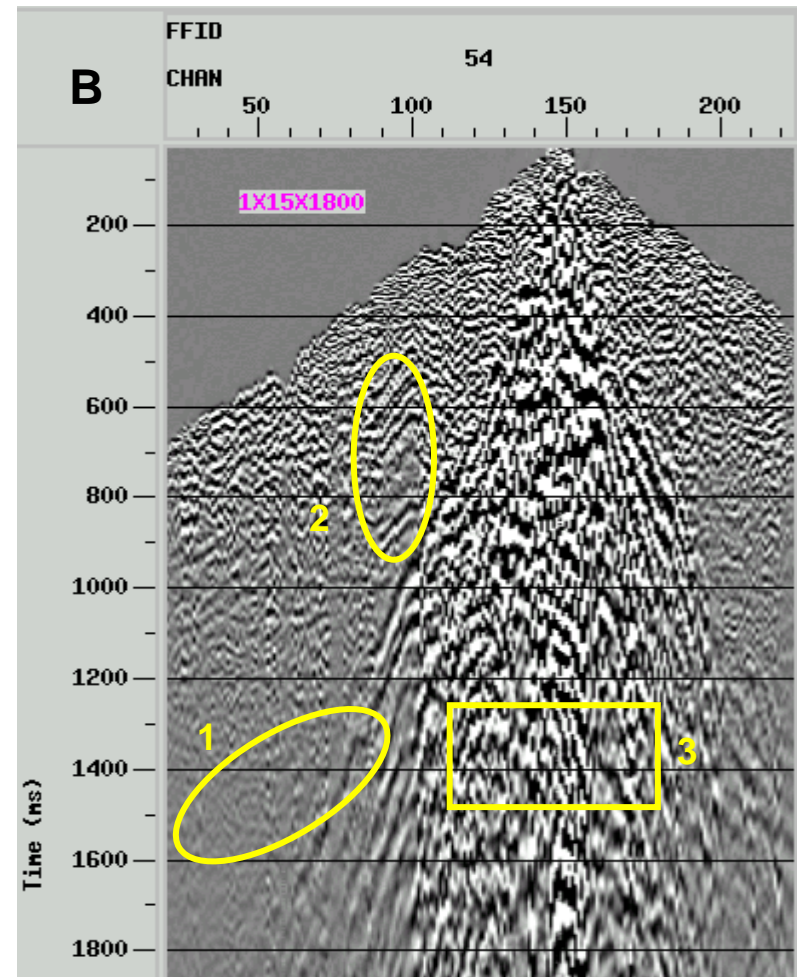
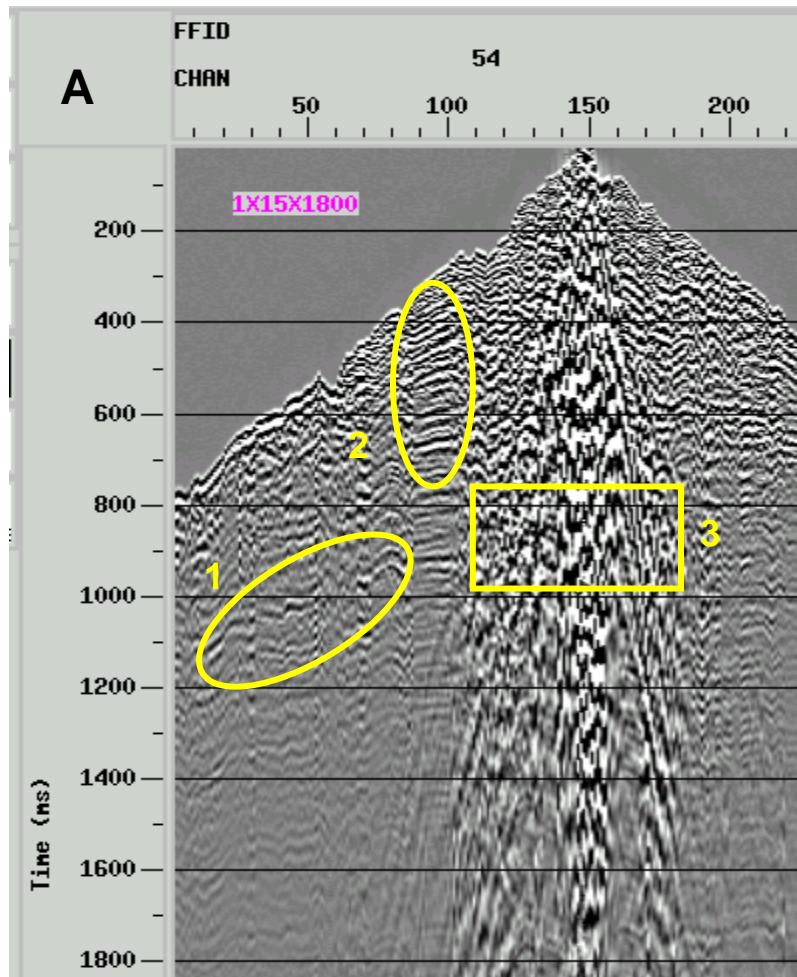


Figura 36. Registro de onda PP y onda convertida para la misma configuración de patrón de 1x15x1800, sector 1

La configuración de 1x15x1800 (Figura 36) presenta reflectores mas definidos para los dos tipos de ondas que la configuración de 1x15x3600 (Figura 37) los cuales se observan de muy baja frecuencia.

La configuración de patrón 1x15x3600 en el sector 2 “Cuaternario” (Figura 37) el cono del *ground roll* es mayor en el registro de onda PS que el registro de onda PP.

Para la configuración de patrón 1x15x3600 (Figura 37) se observan eventos de baja frecuencias para ambos tipos de registro PP-PS. Pero en 1 (Figura 37.B) es posible identificar mas reflectores que en la Figura 37.A.

La configuración de patrón de 1x15x3600 para la zona del Cuaternario presenta bajo contenido de frecuencias, la zona del *ground roll* es mayor en el registro de onda convertida (Figura 37.B).

El cono se observa más amplio y definido en los registros de Onda convertida para el sector 2 (Figura 37.B) que en la zona 3 (Figura 38.B):

En la Figura 38, en el sector 2, la configuración de patrón de 1x15x4500 enmascara la reflexión

Para la configuración de patrón 1x20x2700, la respuesta sísmica fue muy similar para los dos tipos de onda (Figura 39).

En general, el registro con la configuración 1x20x2700 es de baja energía para los dos tipos de onda.

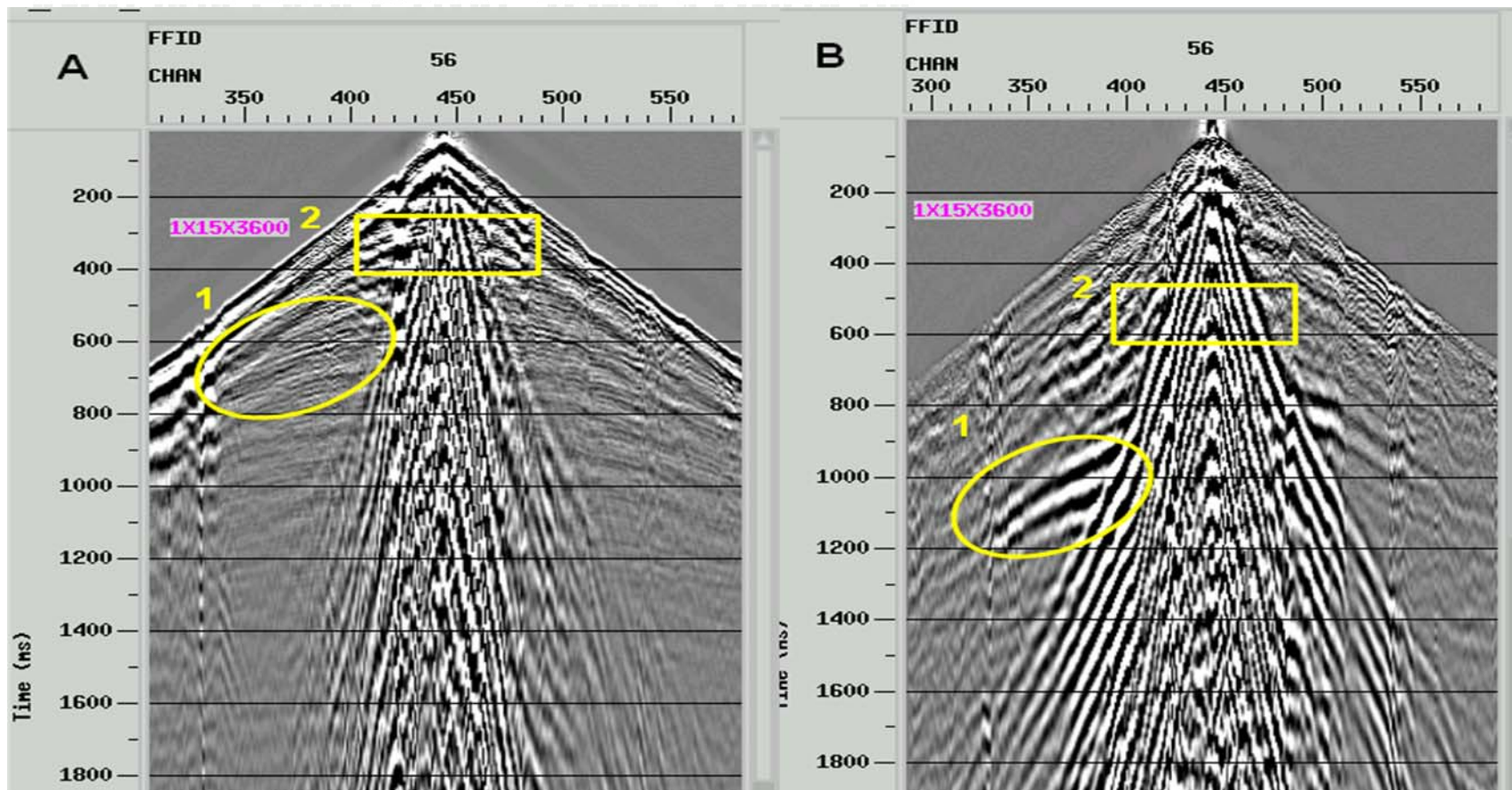


Figura 37. Registro de disparo onda PP y onda convertida para la configuración de patrón 1x15x3600, sector 2.

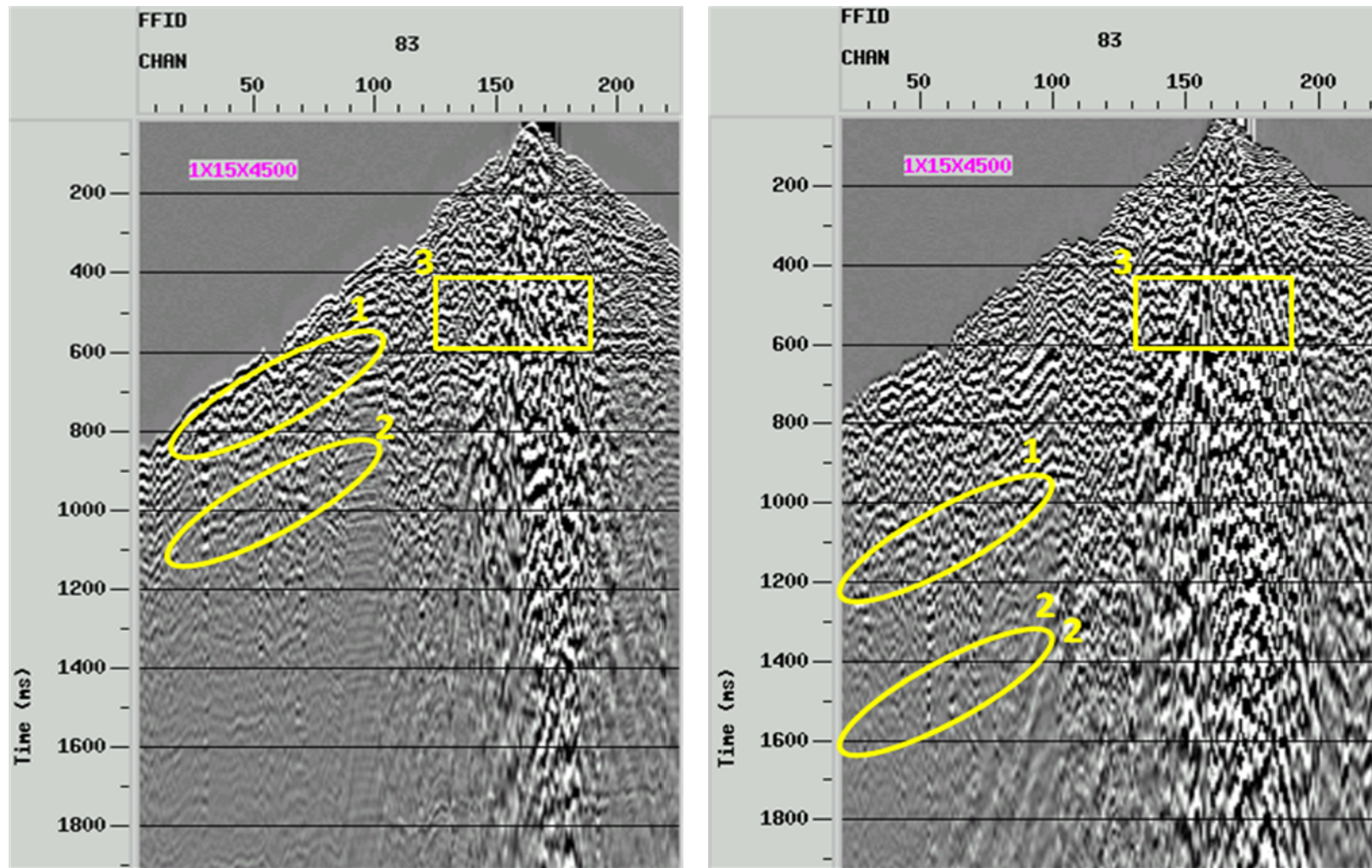


Figura 38. Registro de disparo onda PP y onda convertida para la configuración de patrón de 1x15x4500, sector 1.

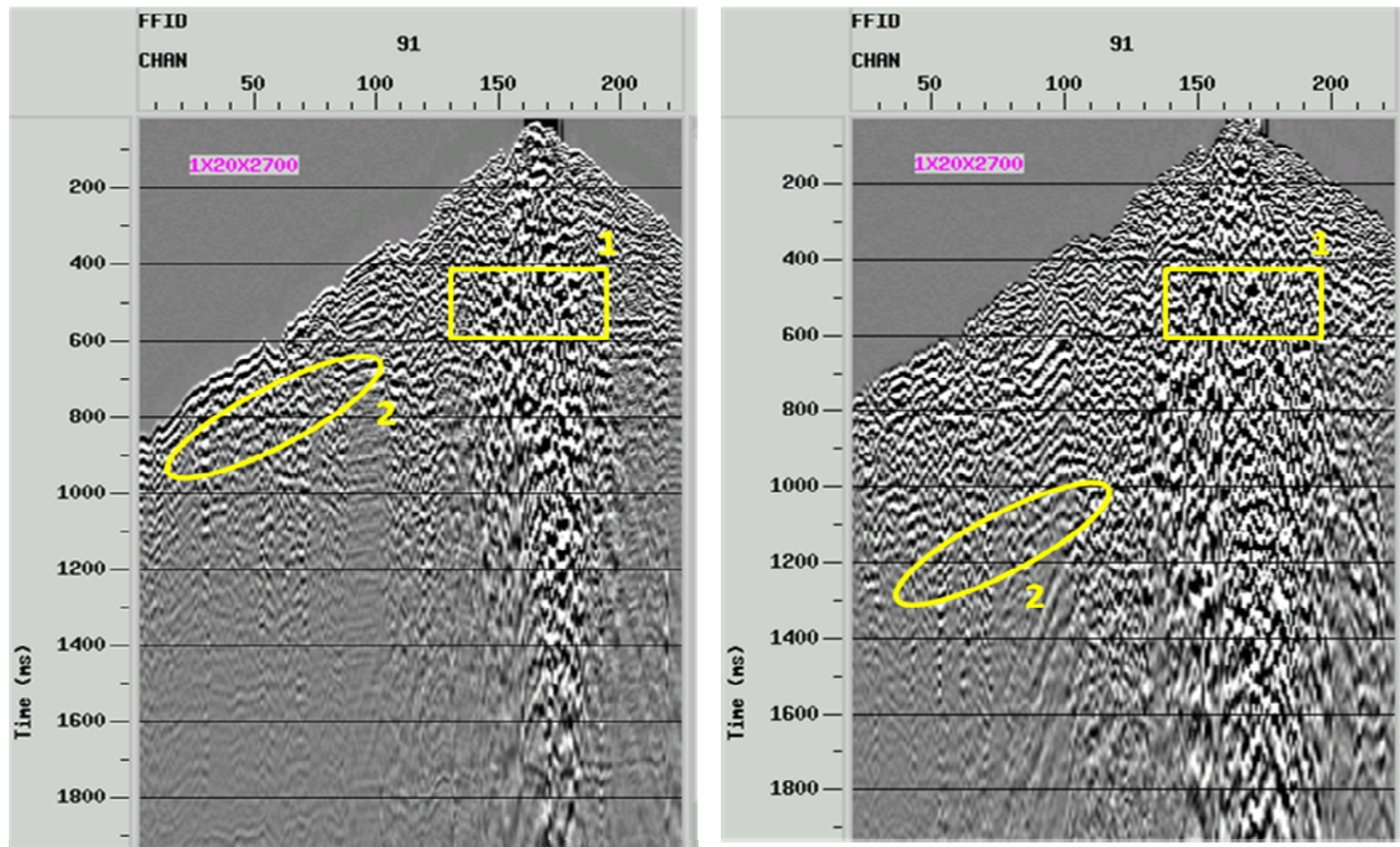


Figura 39. Registro de disparo onda PP y onda convertida para la configuración de patrón 1x20x2700, sector 1.

La configuración de patrón 1x15x3600 conserva las frecuencias en un intervalo más amplio (10 a 30Hz), que la configuración de patrón 1x15x1800 la cual es puntal (10Hz). Después de los 40Hz, el decaimiento en la frecuencia es mayor para la configuración de 1x15x1800.

En la Figura 40.E, 40-G presenta un pico de máxima frecuencia 10Hz, pero en la Figura 40.F, 40-H la frecuencia se conserva en un intervalo más amplio 10-30Hz pero con menos amplitud.

En general, la Figura 40 presenta el mayor pico en el intervalo de 10-30Hz, después de este intervalo las frecuencias se observan atenuadas. Las configuraciones de patrón de 1x10x2700 y 1x20x2700 conservan las frecuencias en el intervalo de 40Hz en adelante.

En el intervalo de 30-60Hz el decaimiento en la frecuencia es mayor en la Figura 41 que en la Figura 40.

En la Figura 41, el máximo contenido de frecuencias se encuentra en el intervalo de 5-20Hz después de 20Hz las frecuencias se atenúan y decaen rápidamente.

En la Figura 42 se observó en general, que si el tamaño de la carga es superior a 3600 gramos, la respuesta sísmica de los registro es muy similar, por lo cual no es justificable usar mayor tamaño de carga, porque los costos se incrementarían y la respuesta sísmica sería equivalente (Figura 52).

El contenido de frecuencias para la zona 2 (Figura 41) decae más rápido que en la zona 1 (Figura 40).

La zona 2, no es el sector ideal para elegir la configuración de patrón, porque para los diferentes patrones se presenta similar respuesta sísmica, esto es asociado a que la zona 2 está conformada por depósitos aluviales formados de depósitos no consolidados, para este tipo de litología, la atenuación es alta.

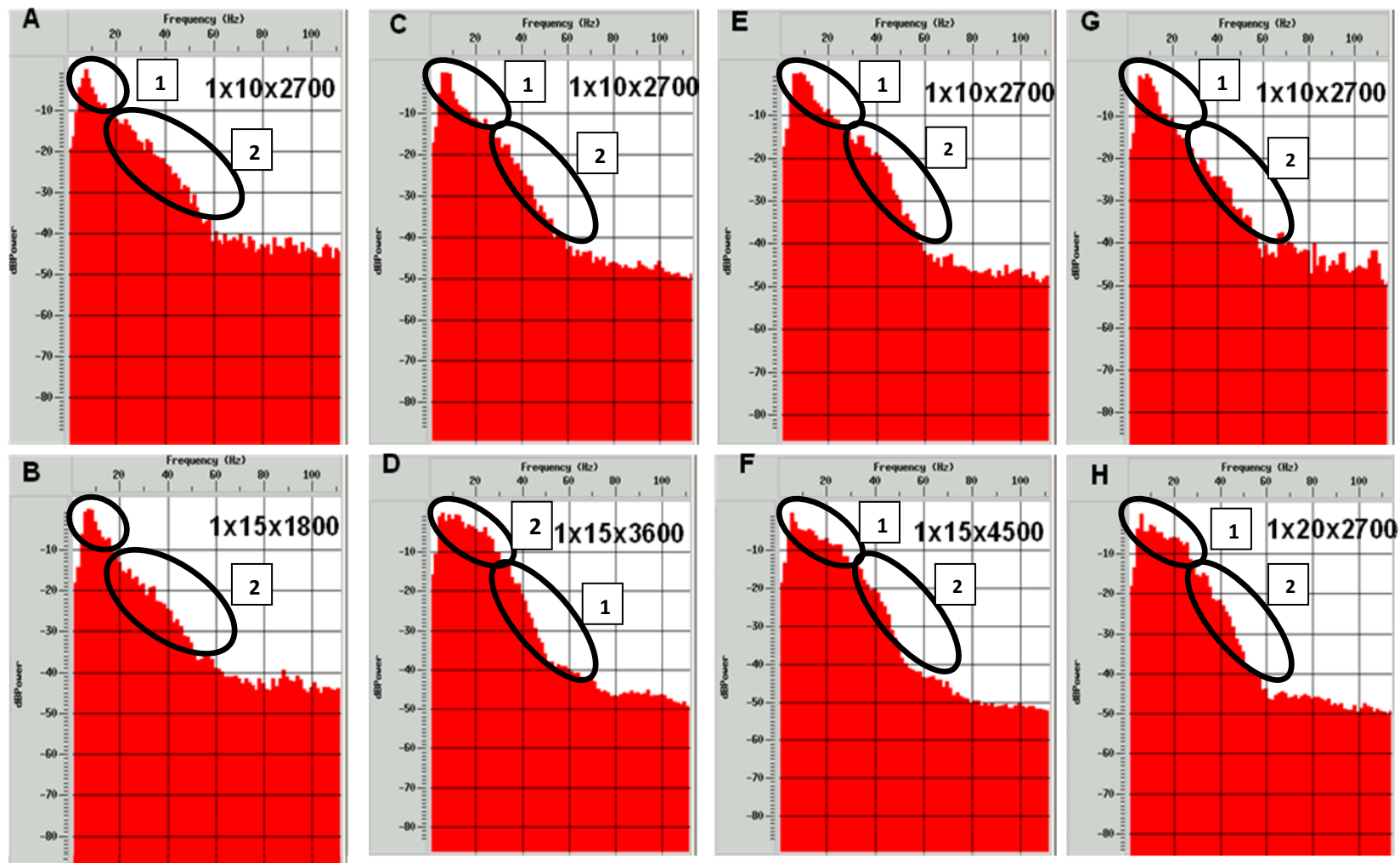


Figura 40. Contenido de frecuencias de cinco configuraciones de patrón, Zona 1 "Terciario" onda convertida.

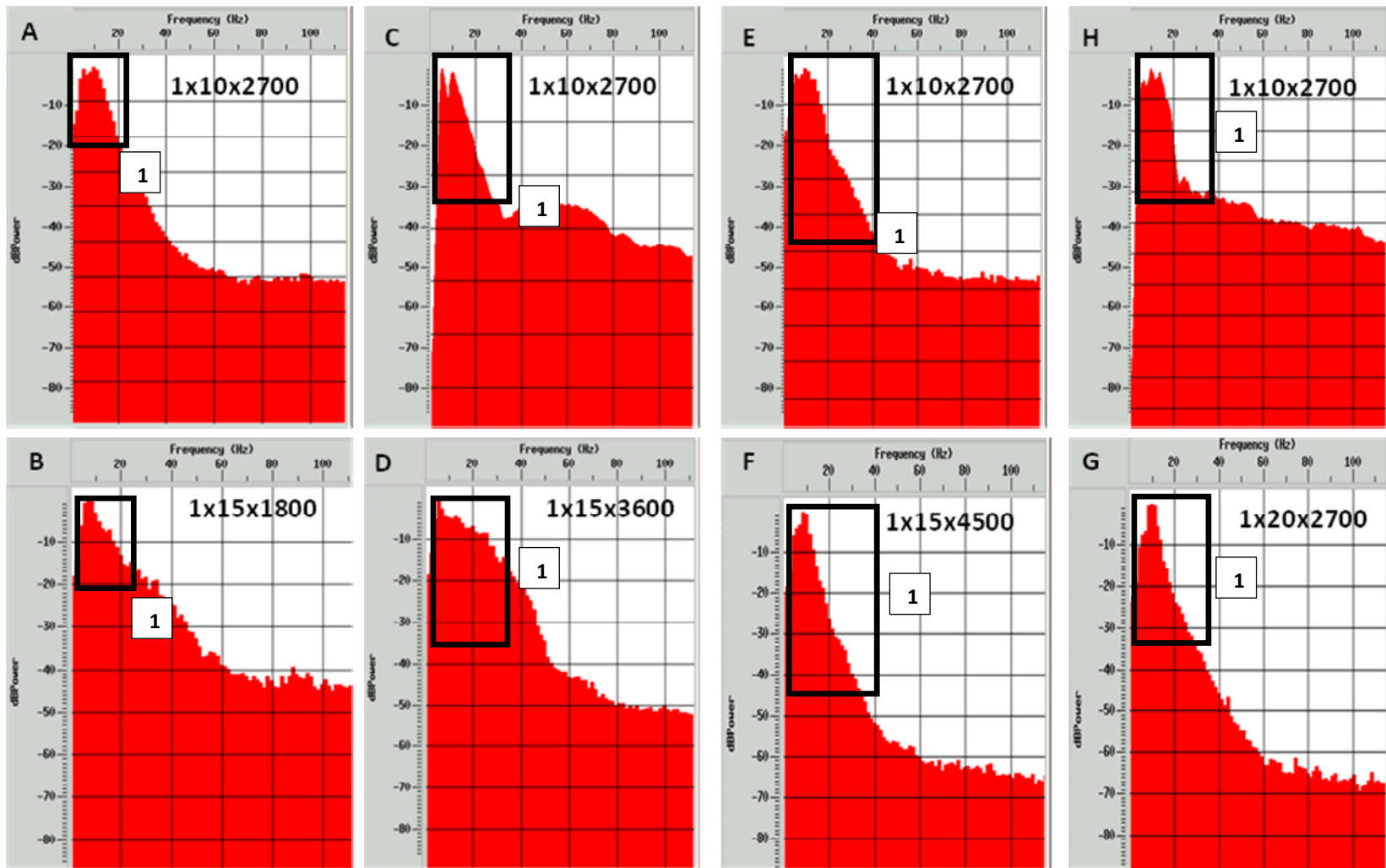


Figura 41. Contenido de frecuencias de cinco configuraciones de patrón Zona 2 “Cuaternario” onda convertida.

7.2.4 Cálculo del Espesor de la Capa Meteorizada

La línea de refracción, se simuló a partir de la línea experimental de 9Km 2D3C del campo Tenerife. La línea de refracción se calculó utilizando inversión tomográfica por medio del programa *GLI*¹⁹.

A partir de la refracción se determinó los siguientes espesores para la capa meteorizada: Zona A: 16.35 metros, Zona B: 13.63 metros, Zona C: 14.7 metros (Figura 42).

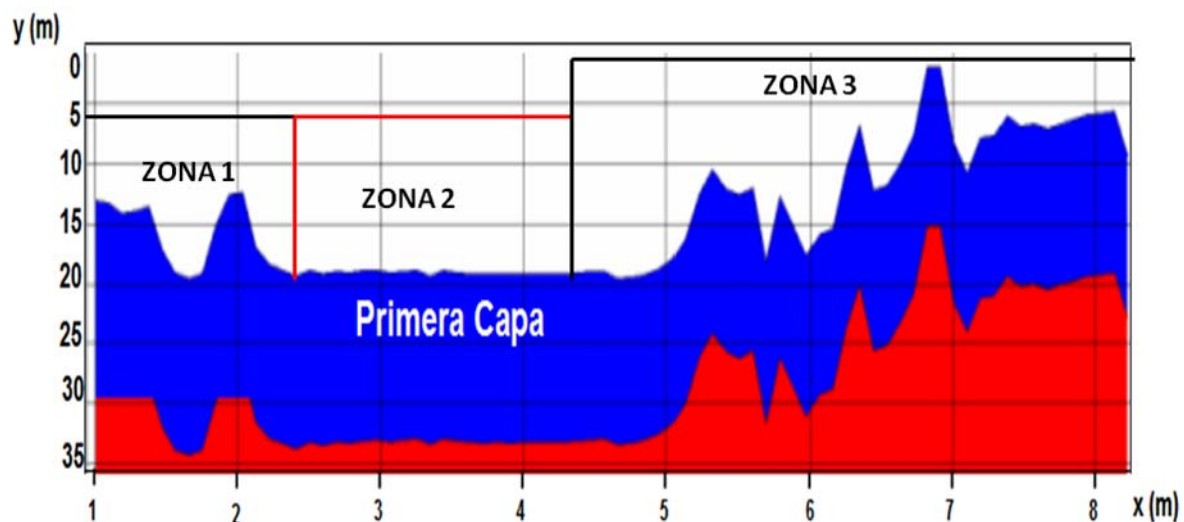


Figura 42. Perfil de refracción sísmica línea experimental.

En la Figura 43 se observa dos registros de disparo con la misma configuración de patrón 1x10x2700 ubicados en el mismo sector geológico (Terciario). La respuesta sísmica para los dos registros es totalmente diferente; en la figura (41.A) se observa un contenido de frecuencias más bajo que la figura (41.C) y el cono del *ground roll* (1) se observa más definido en la figura (43.B).

La diferente respuesta sísmica, para los dos registros (Figura 43) es asociada a que en algunos sectores de la zona el espesor de la capa meteorizada es mayor que la profundidad en la cual se perforo la carga.

¹⁹ GLI: Generalized Linear Inverse

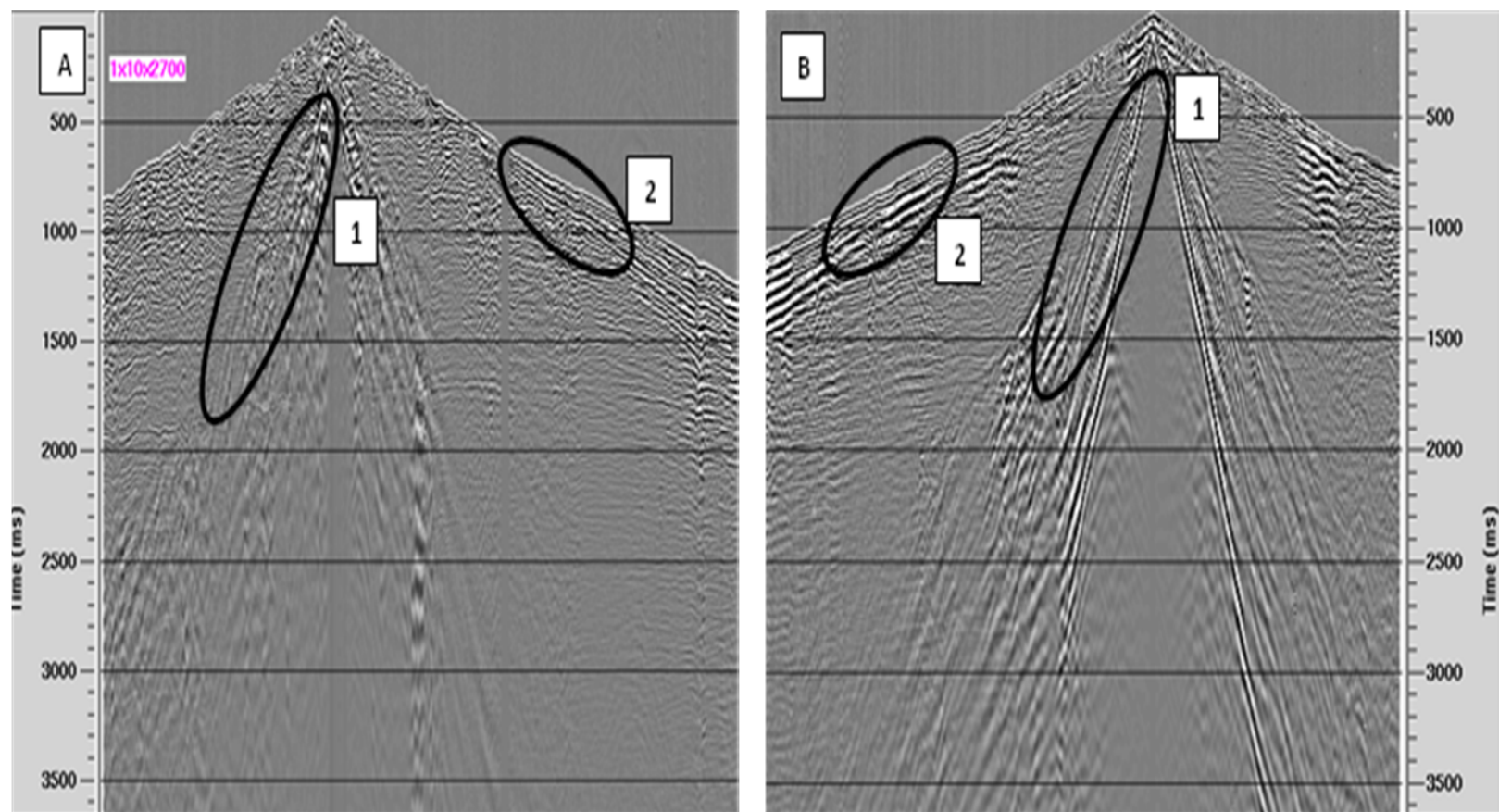


Figura 43. A y B Configuración de patrón 1x10x2700 para la zona 1. (1) Zona de *ground roll*, (2) Reflectores someros

7.2.5 Correlación de los registros con información litológica

Correlacionando la información de pozos con los registros de disparo se clasificaron tres zonas:

- Zona A (Figura 44) : Grupo Real de Edad Terciario
- Zona B (Figura 45) : Depósitos Aluviales de edad Cuaternaria
- Zona C (Figura 46): Base del Grupo Real de Edad Terciario.

Según la información de registros de perforación y muestras del área la descripción litológica en las tres zonas es:

Zona A: Las rocas ubicadas en el sector sur del proyecto corresponden litológicamente: Arcillolitas abigarradas grises, rojizas, gris-rojizas, amarillas y pardas muy poco compactas, deleznales intensamente meteorizadas aflorando mayoritariamente hacia la parte media y sur del proyecto (Figura 44).



Figura 44. Litología grupo Real, nivel arcilloso (Sandoval, 2010).

Estas arcillolitas podrían asociarse posiblemente a la litología que comprende la Formación Enrejado (?), ya que concuerda con las observaciones realizadas en campo y las descripciones de pozo. Además, se identificó en superficie algunos fragmentos de troncos fosilizados (Xilópalos) en esta área, lo cual diferencia a esta formación de las demás que comprenden el Grupo Real (Sandoval, 2010).

Zona C “Edad Terciaria”: El Grupo Real está compuesto por varios niveles geológicos (Figura 46), pero en el sector Norte del Campo Tenerife asociado al levantamiento de la estructura y la erosión es posible que los niveles del techo de este grupo hayan sido erosionados (?), razón por la cual en la zona afloran rocas diferentes que en la zona sur (Figura 44).

Básicamente, la zona 3, está conformada por conglomerados amarillos gravosoportados en matriz arenoarcillosa con una armazón compuesta por guijarros, guijos, cantos (Figura 45.A).

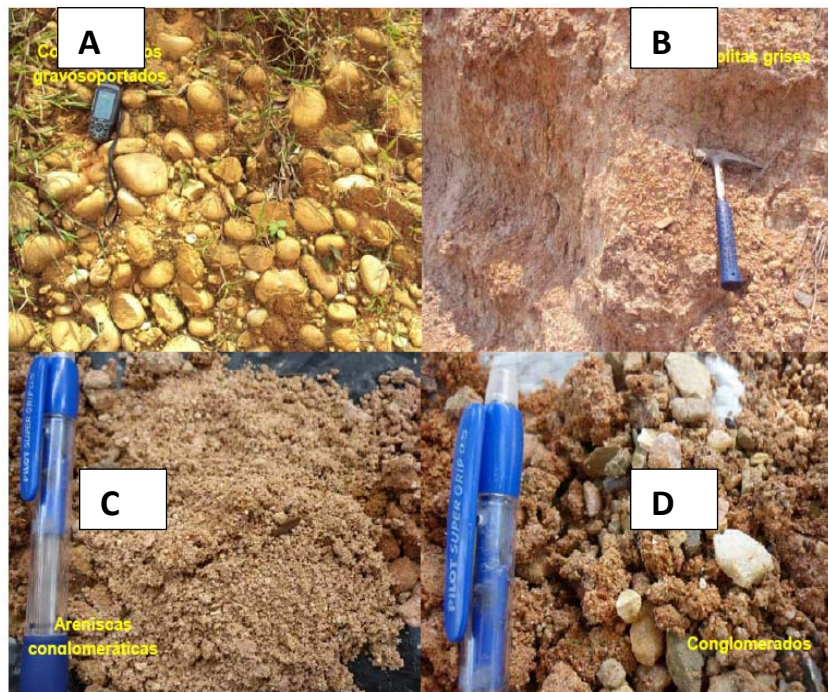


Figura 45. Litología Grupo Real (Sandoval, 2010).

Según las características evidenciadas en campo, esta unidad podría atribuirse litológicamente a la Formación Lluvia (?) ubicada en la base del Grupo Real. Teniendo en cuenta que de las cinco unidades que lo conforman, la Formación Lluvia es la única que posee niveles conglomeráticos con tamaños de gravas que llegan a cantos y hasta bloques (Sandoval, 2010).

En la figura 32 se identificaron tres tipos de respuesta sísmica contrario a la cartografía de superficie (Sandoval, 2009) en la cual se mapeó dos unidades: Terciario y Cuaternario. Correlacionando la información de pozo se logró diferenciar la unidad del Terciario en dos zonas: zona sur nivel arcillolítico y zona norte nivel conglomerático y se asoció a las dos respuestas sísmicas diferentes obtenidas para la formación Terciario (Figura 47).

Zona B “Edad Cuaternaria”: Depósitos aluviales (Qal)

Los depósitos aluviales están conformados por materiales no consolidados de aluvión y partículas finas; como arcillas y limos grises, asociados principalmente al río La Colorada. Estos materiales se encuentran ampliamente distribuidos hacia el centro del proyecto y en proporción es la unidad que ocupa el mayor espacio en el área de adquisición. Estos depósitos están conformados por conglomerados granosoportado con armazón que va desde guijarros hasta bloques esféricos, subesféricos redondeados y bien redondeados con escasa matriz de arcilla rojiza (Figura 46).



Figura 46. Depósitos Cuaternarios (Sandoval, 2010)

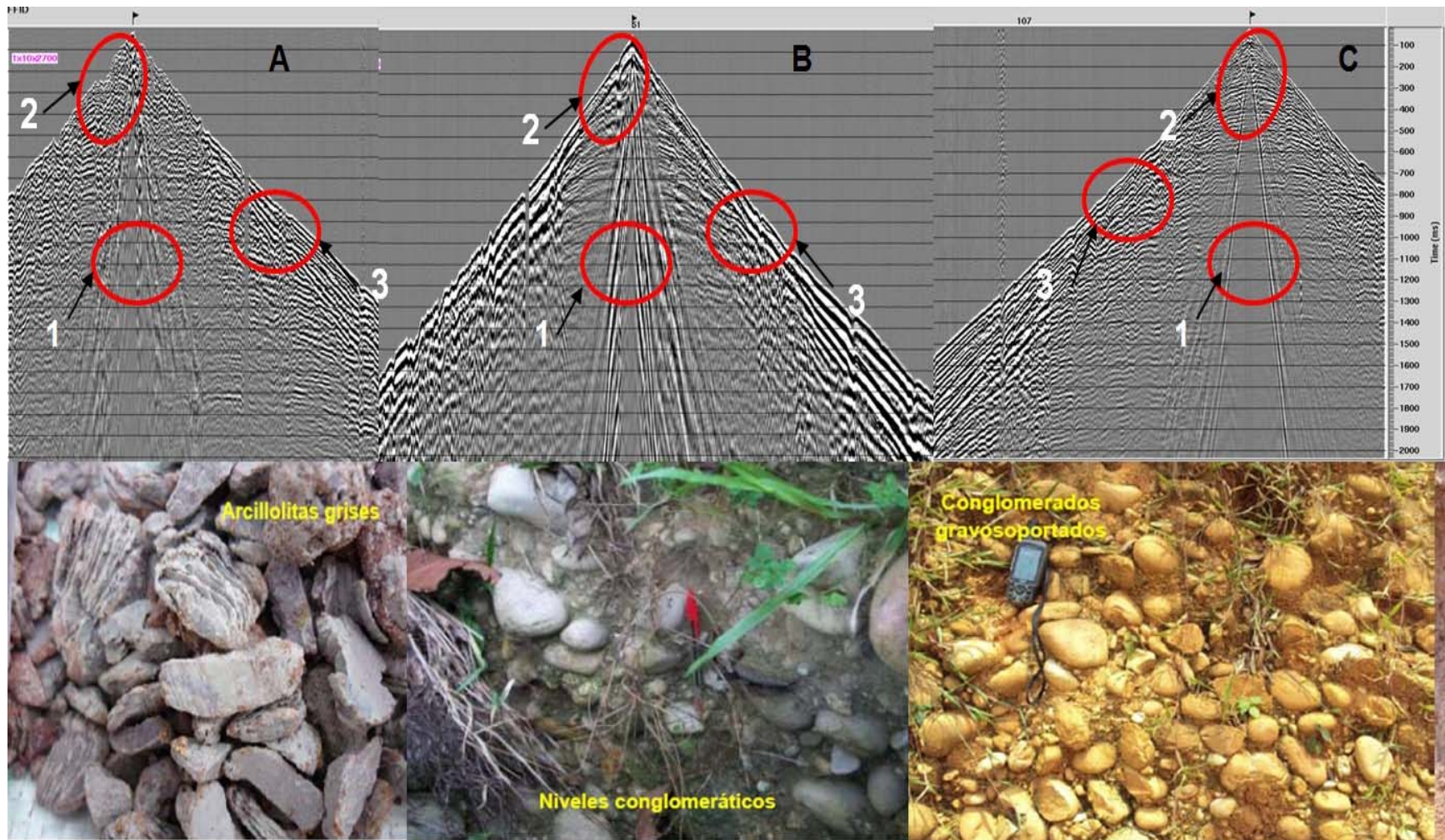


Figura 47. Correlación registros sísmicos y geológicos Campo Tenerife **A** y **C** Terciario, **B**. Cuaternario.

7.3 Análisis de los parámetros de diseño: Tamaño de *bin*

En esta etapa, se analiza cómo los parámetros del diseño (Tamaño de *Bin*) afectan en la iluminación y calidad de la interpretación de un canal meándrico para el caso de las ondas PS.

7.3.1 Modelado Geométrico del Canal

Debido a que no se contaba con sísmica 3D en el campo Tenerife y no ha sido posible obtener una geoforma de un canal para la formación Mugrosa este experimento simuló una geoforma a partir de la geometría del río actual. Para ello se visualizó una imagen digital de la zona con la mejor resolución posible y se dibujó la geometría del río Opón (Figura 48) con el objetivo de analizar cómo influye el tamaño de *bin* en la iluminación de una geoforma meandriforme para el caso de onda convertida.

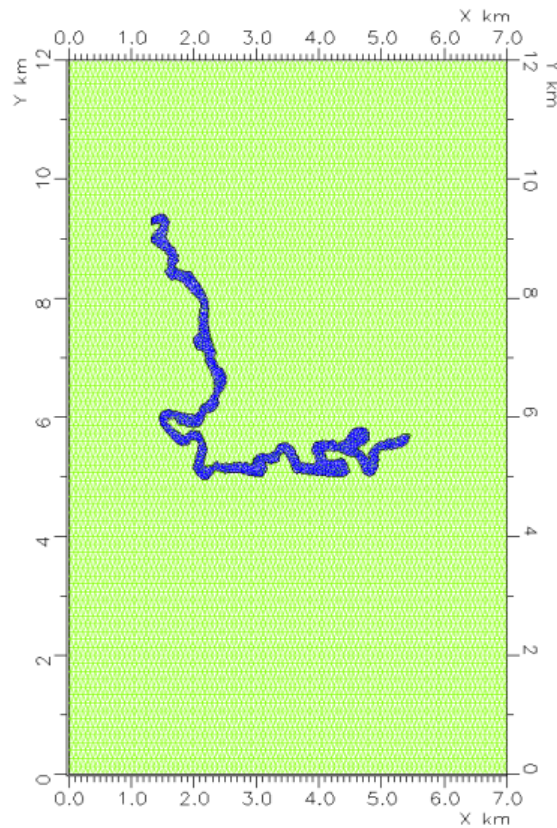


Figura 48. Geometría canal meándrico.

7.3.2 Creación del Modelo Geológico y Geofísico

Se empleó el Modelo A, de la metodología 1, pero con la variante que en el bloque Mugrosa zona C se adicionó un horizonte con la geometría de canal modelado en la etapa anterior (Figura 49).

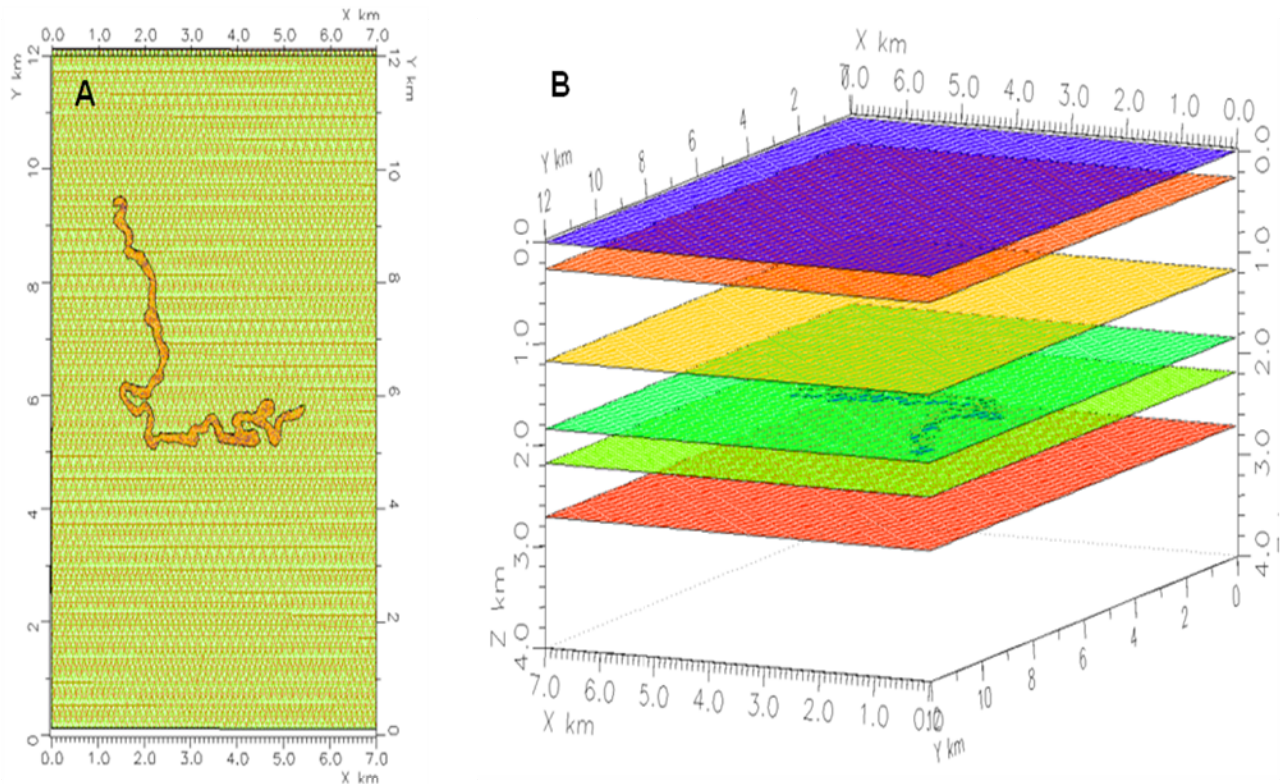


Figura 49. A Modelo Capas Planas, vista superior del canal meándrico. **B** Modelo Tenerife vista frontal para el horizonte mugrosa zona c “1946m”.

Para determinar las zonas de modelado para el canal meándrico fue necesario interpretar y determinar qué elementos geomorfológicos serian importantes, los principales son (Figura 50): Canal principal, Barras de meandro (Point Bar), Diques Naturales (Natural Levee), Planicie de inundación (Flood Plain), Áreas de desborde (Crevasse splay) (Miall, 1996).

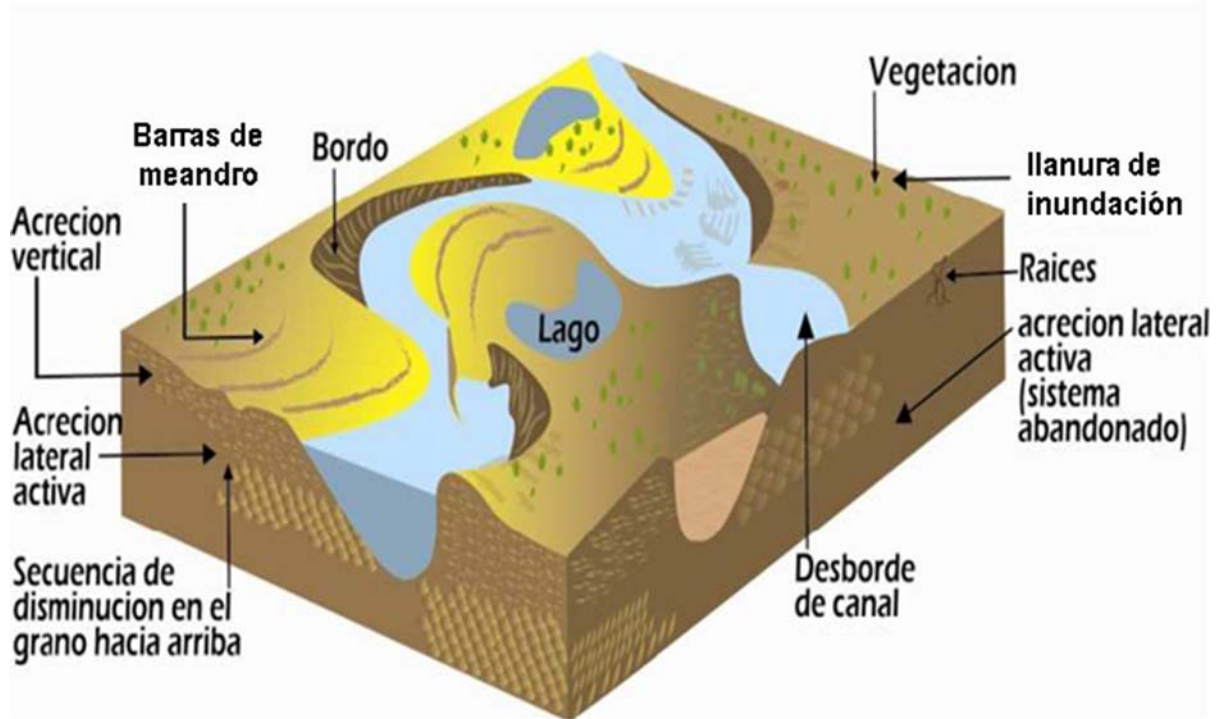


Figura 50. Componentes morfológicos de un sistema fluvial tipo meándrico (Modificado de Miall, 1996).

El interés en el Campo Tenerife es identificar la configuración geométrica del canal y el límite o sello de las arenas con lodos, por esta razón se determinó que los dos elementos geomorfológicos importantes para simular la configuración de esta geoforma, son: canal principal y llanura de inundación.

Determinados los elementos geomorfológicos para el modelado, se prosiguió a cuantificar las propiedades geofísicas del modelo; para ello se analizaron los registros de perforación del área para conocer un poco de la geología de esta geoforma fluvial.

Las propiedades geofísicas asignadas al canal meándrico se tomaron en referencia a Press (1966) para el canal principal y Wiest (1984) para la llanura de inundación (Tabla 5)

Tabla 5. Parámetros geofísicos, horizonte objetivo Formación Mugrosa zona C.

Formación	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (<i>kg.m³</i>)	Profundidad (metros)
Canal principal	1900	2207	2.52	2300
Llanura de inundación	2520	1536	2.48	2300

Las propiedades geofísicas de referencia fueron las asignadas al modelo de capas planas (Modelo A) excluyendo, las propiedades geofísicas de la geometría del canal.

El siguiente parámetro importante para el modelado geofísico y geológico es la estimación del espesor de los canales meándricos para el Campo Tenerife. Para ello se analizaron los registros: sísmico, densidad y se identificaron los espesores de arena neta y arena neta con hidrocarburo en los tres pozos del área; Tenerife 1, Tenerife 2 y Tenerife 3 para la Formación Mugrosa C (Figura 51).

En general el promedio del espesor de arenas netas y arenas netas con hidrocarburo es (Tabla 6):

Tabla 6. Espesor promedio de arena neta y arena neta con hidrocarburo, formación mugrosa C.

Pozo	Arena Neta (metros)	Arena Neta con Hidrocarburo (metros)
T1	8.42	3.64
T2	8.33	4.69
T3	13.85	0.95

Debido a que el máximo espesor de arenas netas con hidrocarburo fue 13.85 metros, es difícil comprometer un diseño de parámetros para resolver esta resolución vertical, la alternativa sería realizar un diseño en el cual se conserve la resolución horizontal para iluminar la geoforma del canal.

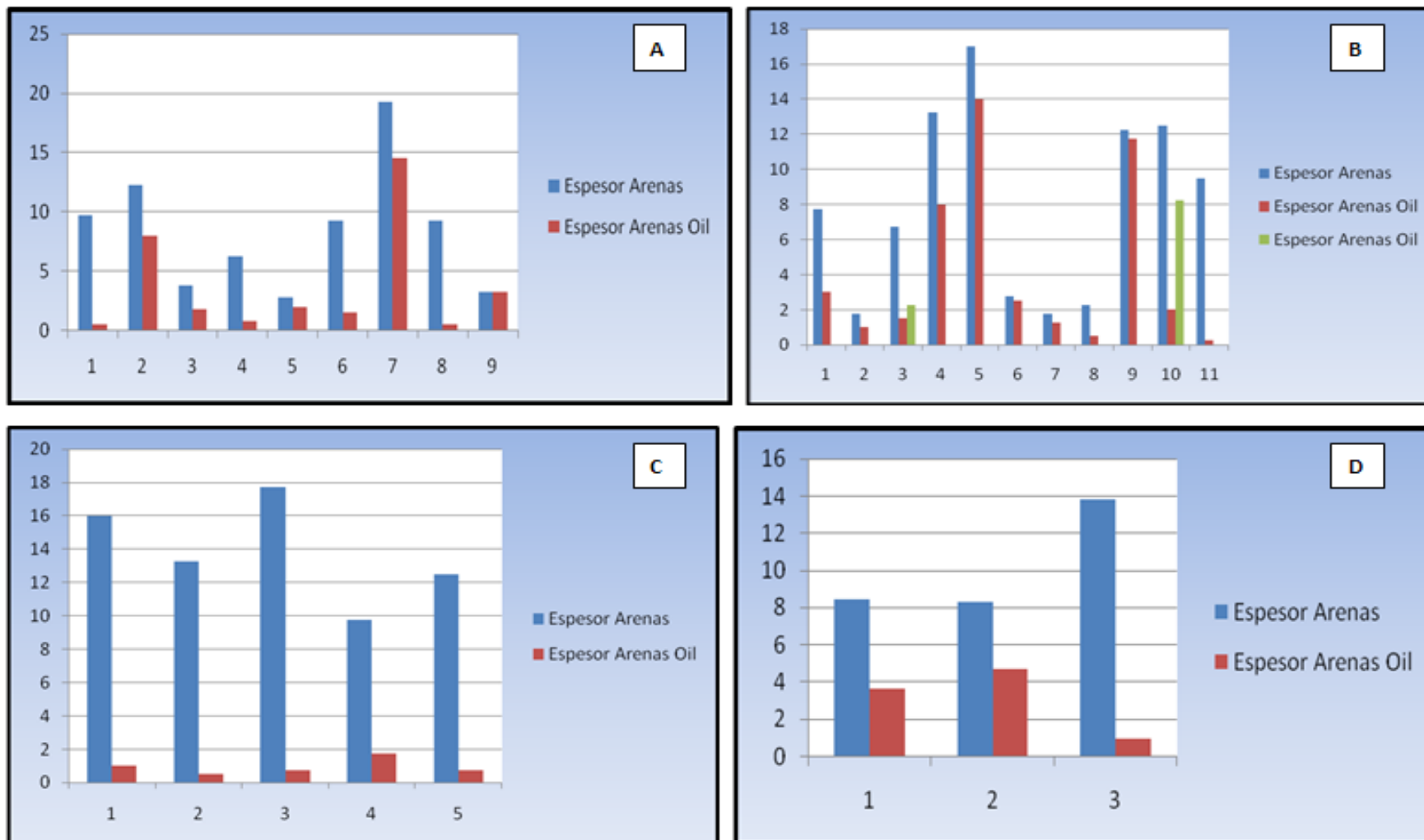


Figura 51. Análisis estadístico de los espesores de arena y arena neta con hidrocarburo para la formación mugrosa C. Tenerife.

7.3.3 Simulación de la adquisición sísmica en la profundidad del horizonte "canal meándrico"

Se calcularon cuatro geometrías de diseño con similares características (Tabla 7), con el objeto de analizar cómo fue la iluminación de estas cuatro geometrías en una geoforma meándrica.

Los cuatro tamaños de *bin* empleados para la iluminación onda PS fueron: (1) *bin* 10x10, (2) *bin* 10x20, (3) *bin* 20x10, (4) *bin* 20x20 (Tabla 7).

Tabla 7. Configuración geométrica para los cuatro diseños sísmicos.

Parámetros	Geometría 1	Geometría 2	Geometría 3	Geometría 4
Tamaño de <i>bin</i>	10x10	10x20	20X10	20x20
Distancia entre receptoras	20	20	40	40
Distancia entre fuentes	20	40	20	40
Número de líneas de fuentes	13	13	13	13
Número de líneas de receptoras	18	18	18	18
Distancia entre líneas receptoras	318	318	318	318
Distancia entre líneas de fuente	216	216	216	216

Después de obtener el modelo geofísico se simuló la geometría de adquisición para cada experimento. La simulación de la adquisición se tomo para ambos tipos de onda PP-PS en el horizonte objetivo: 1946 metros Mugrosa zona C "Canal Meándrico" (Figura 52).

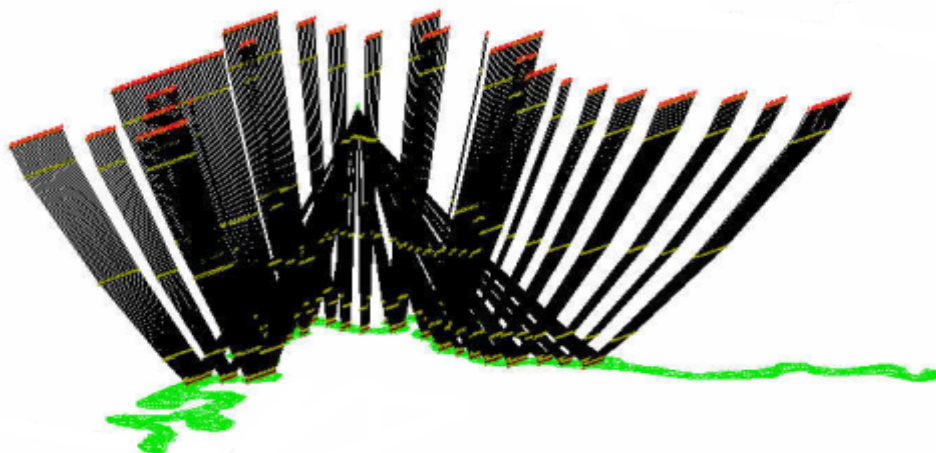


Figura 52. Iluminación Horizonte objetivo a 1946 metros "Canal Meándrico"

La Figura 53 ilustra la iluminación de cuatro geometrías de diseño para un canal meándrico.

Los tamaños de *bin* 10x10 y 10x20, son similares en iluminación. En los sectores (1) y (3) es posible identificar el meandro y (2) la sinuosidad es distinguible en ambas imágenes (Figura 53A y 53B).

Es importante resaltar que en la Figura 53.C es similar a las Figuras 53.A y 53.B, pero en esta imagen (53.C) se observa que se está perdiendo resolución.

En la Figura 53.D ilustra el caso crítico, en el cual la geoforma meándrica es muy difícil identificarla, se perdió resolución en los sectores (1), (2) y (3) en los cuales el río serpentea más.

Tomando en cuenta el resultado anterior y las sugerencias Lawton (2003) es importante evitar tamaños de bin cuadrados sin importar si el objetivo es estratigráfico "Sistemas Fluviales" por la asimetría de la trayectoria del rayo PS tiende a acumular los CCP más cerca de la posición de receptores y es un desgaste económico emplear mas fuentes que no están iluminando la estructura.

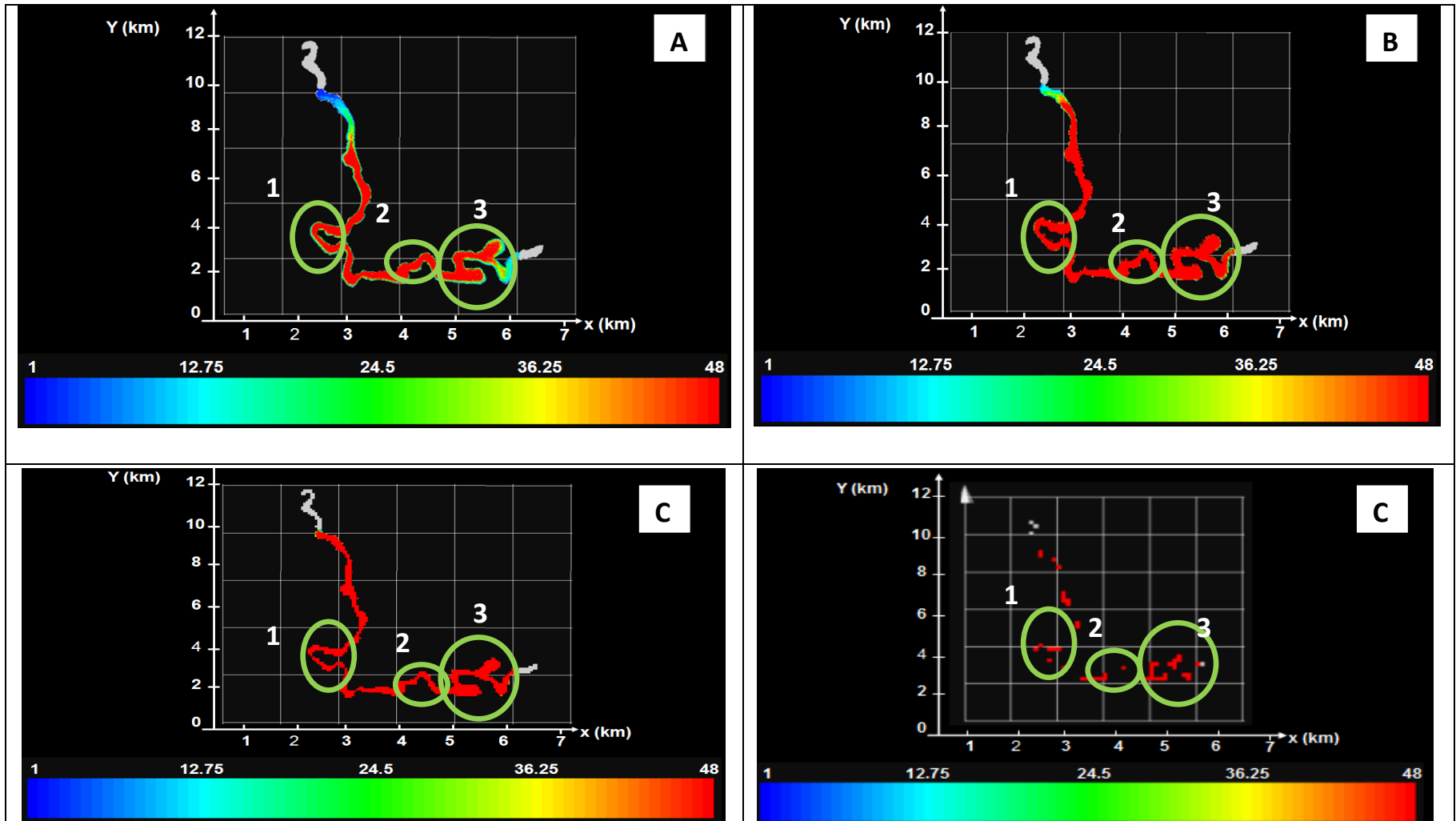


Figura 53. Iluminación Canal Meándrico. **A.** Tamaño de *bin* 10x10, **B.** Tamaño de *bin* 10x20, **C.** Tamaño de *bin* 20x10, **D.** Tamaño de *bin* 20x20

7.4 Configuración geométrica

Este experimento consistió en variar la geometría de adquisición a partir de una configuración de parámetros fija y analizar como el efecto de la huella del diseño podría ser atenuada en diseños de onda convertida.

7.4.1 Diseño de la geometría de adquisición

Se emplearon los parámetros de diseño *pre-plot* del campo Tenerife (Guevara, 2010) y se varió la configuración geométrica.

Las geometrías empleadas en el análisis fueron: Ortogonal, Aleatoria, Sinusoidal y Diagonal (Figura 54).

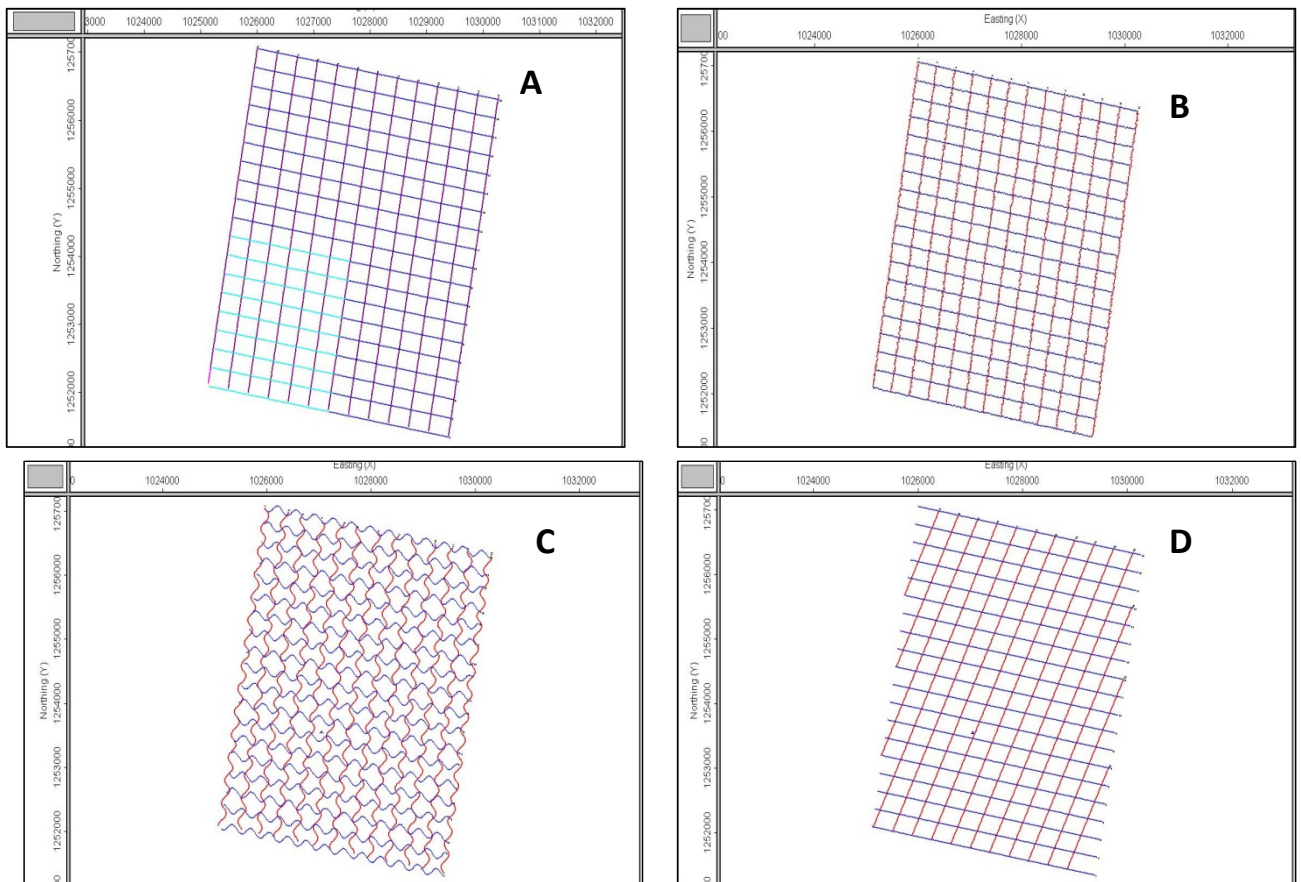


Figura 54. Configuraciones geométricas. **A.** Ortogonal. **B.** Aleatoria. **C.** Sinusoidal. **D.** Diagonal

- **Geometría Ortogonal:** Se empleó la geometría ortogonal *pre-plot* del Campo Tenerife 3D -3C (Guevara, 2010)
- **Geometría Aleatoria:** La aleatoriedad se programó una distancia igual o menor del tamaño de *bin* “20 metros” (Tabla 8).

Tabla 8. Pruebas de aleatoriedad.

Prueba	Aleatoriedad (m)	Porcentaje (%)	<i>Fold P</i>	<i>Fold PS</i>
1	2	10%	72	77
2	4	20%	51	75
3	6	30%	55	74
4	8	40%	69	79
5	10	50%	72	77
6	12	60%	48	72
7	14	70%	74	80
8	16	80%	64	76
9	18	90%	82	84
10	20	100%	77	96

Los resultados de las pruebas de aleatoriedad muestran que el efecto de la huella del diseño se atenúa a partir de 12 metros de aleatoriedad. Antes de ese valor solo se realizan esfuerzos por incrementar el valor de cubrimiento y no en disminuir el efecto de la huella del diseño.

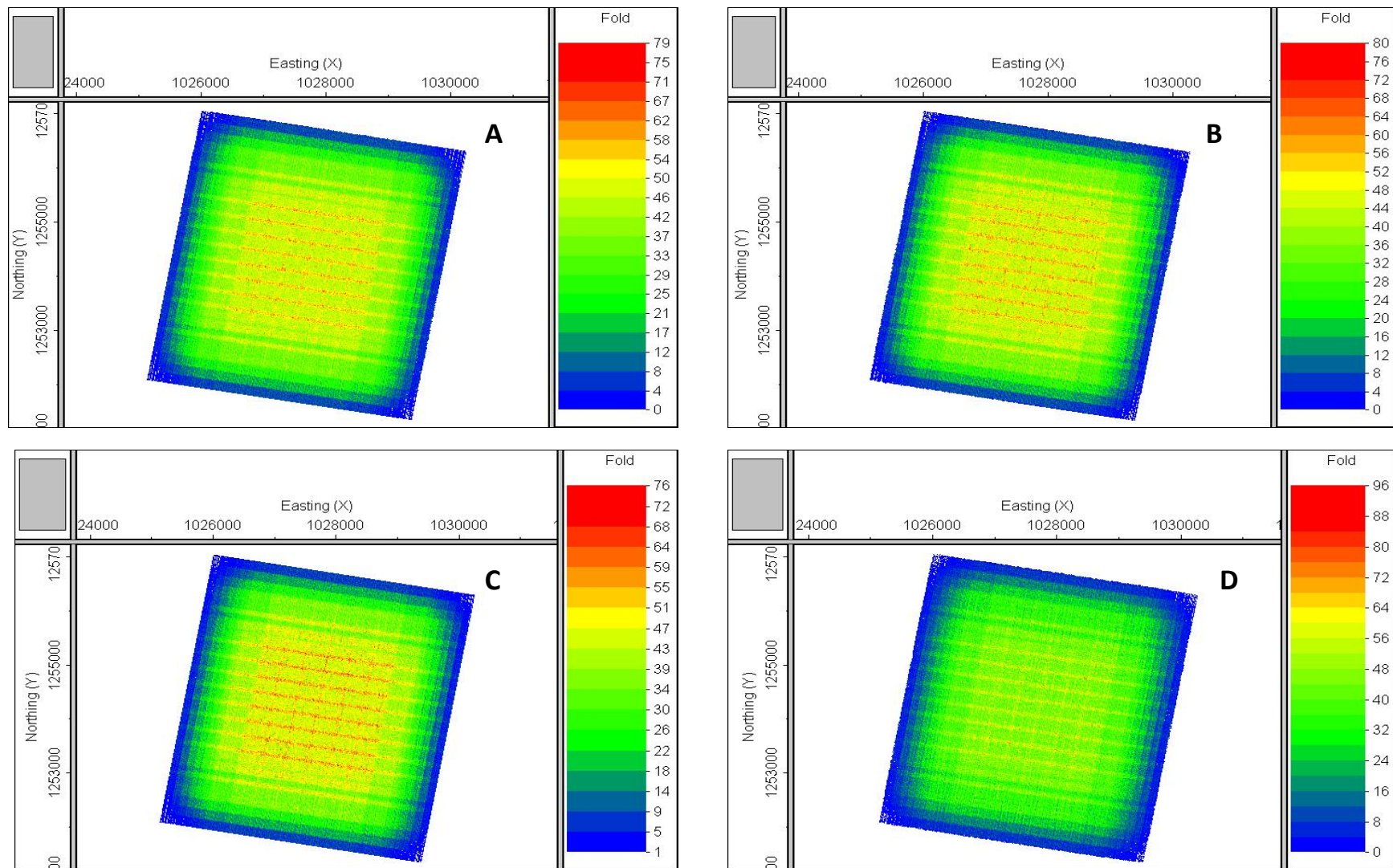


Figura 55. Distribución de *fold* para onda convertida en geometrías aleatorias. **A.** Aleatoriedad 8m, **B.** Aleatoriedad 12m, **C.** Aleatoriedad 16m, **D.** Aleatoriedad 20m.

7.4.2 Generación diagrama de calidad: Cubrimiento

- **Geometría Sinusoidal:** Se propuso este tipo de geometría porque es variable en un intervalo de amplitud conocida.

La fórmula para generar la función sinusoidal en el diseño se representó por:

$$y' = A \sin (2\pi / \lambda * x')$$
 ecuación (5)

Donde;

A: Amplitud de la ondícula

y': coordenada y

x': coordenada x

λ : longitud de onda

Se realizaron dos pruebas para este tipo de geometría (Tabla 9)

Tabla 9. Pruebas geometrías sinusoidales.

Prueba	Longitud de onda	Amplitud	<i>Fold PS</i>
1	60	60	83
2	20	60	77

En la Figura 56, se observan los dos tipos de geometría sinusoidal.

Se observó que la huella del diseño en la dirección de la línea de disparos es atenuado en la prueba 1 con respecto la prueba 2 (Figura 56.C).

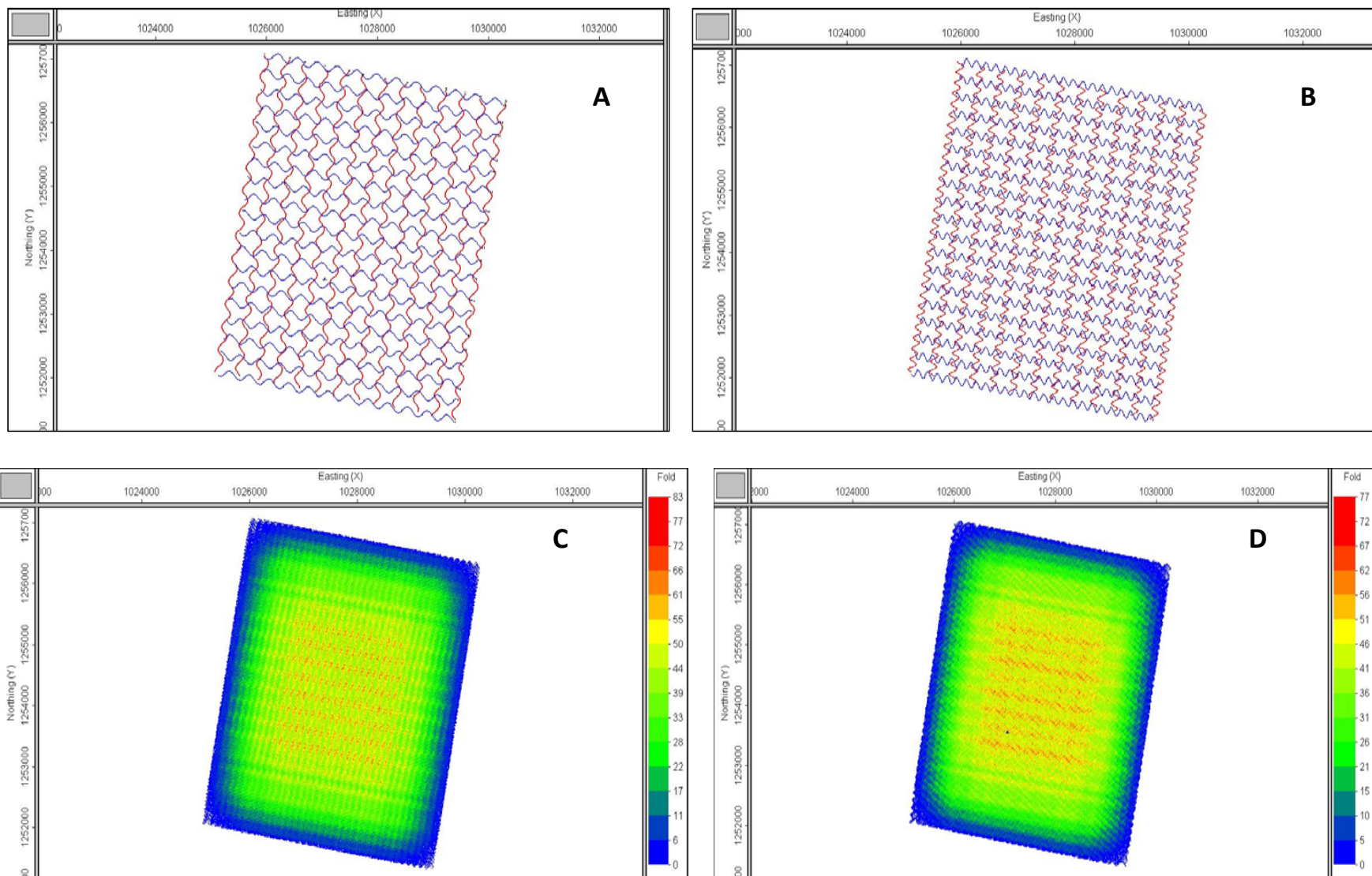


Figura 56. Geometría sinusoidal. **A.** Prueba 1, **B.** Prueba 2. **C.** *Fold PS* prueba 1, **D.** *Fold PS* prueba 2

- **Geometría Diagonal:** Se planteó este tipo de geometría, con el objeto de comprobar si el efecto de la huella del diseño en la dirección de la línea de disparos es disminuido como lo sugiere Cordsen, (1999). El ángulo utilizado entre las líneas de fuente y receptor correspondió a 26.5 grados.

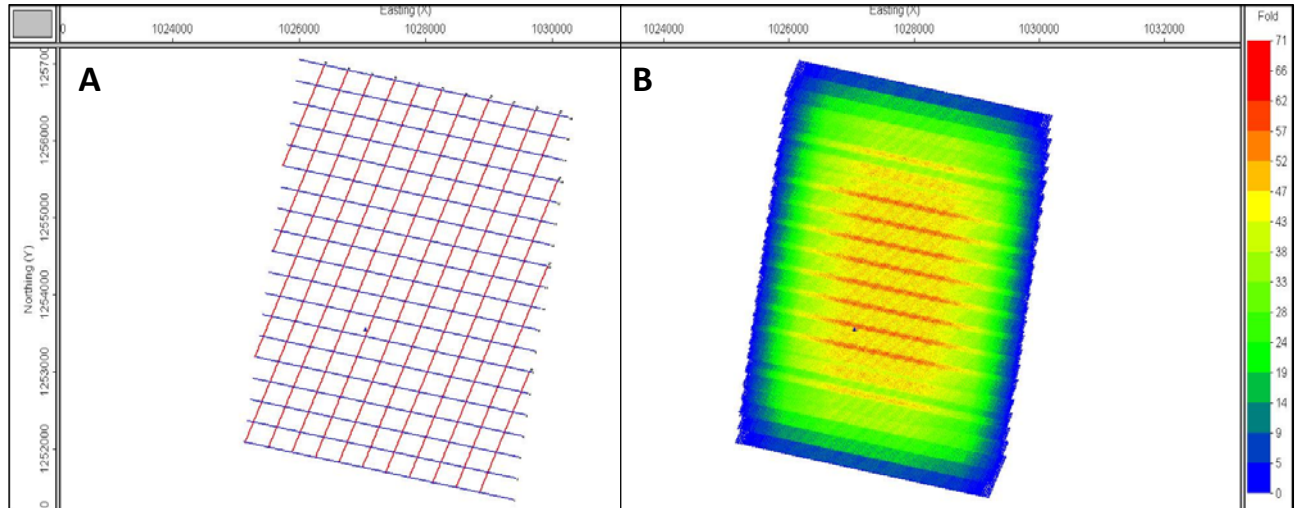


Figura 57. Geometría Diagonal. **A.** Configuración geométrica. **B.** Diagrama de *fold* PS.

Similar a las observaciones de Lawton (2003) el efecto de la huella del diseño se observó atenuado en la dirección de las líneas de disparo (Figura 57).

7.4.3 Estimación de la varianza del *fold* en un segmento in-line:

En esta etapa se analizó como varía el cubrimiento en cada una de las geometrías: ortogonal, aleatoria, sinusoidal en un segmento *crossline* (Figura 58).

Se escogió un segmento *cross-line* porque en esta dirección es posible identificar la variación del efecto de la huella del diseño en la dirección del receptor.

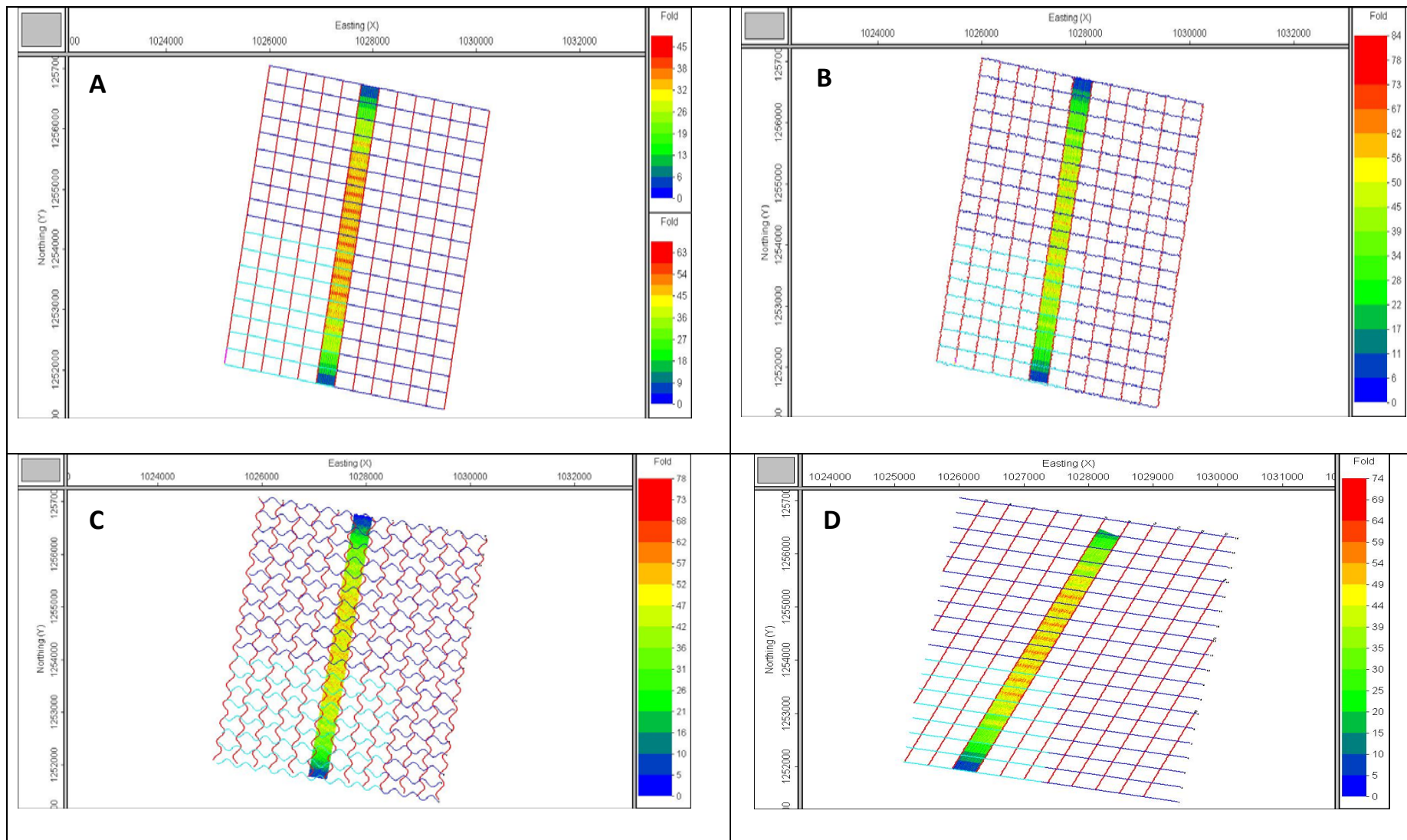


Figura 58. Diagrama de cubrimiento PS en cuatro geometrías de adquisición. **A.** Ortogonal, **B.** Aleatoria, **C.** Sinusoidal, **D.** Diagonal.

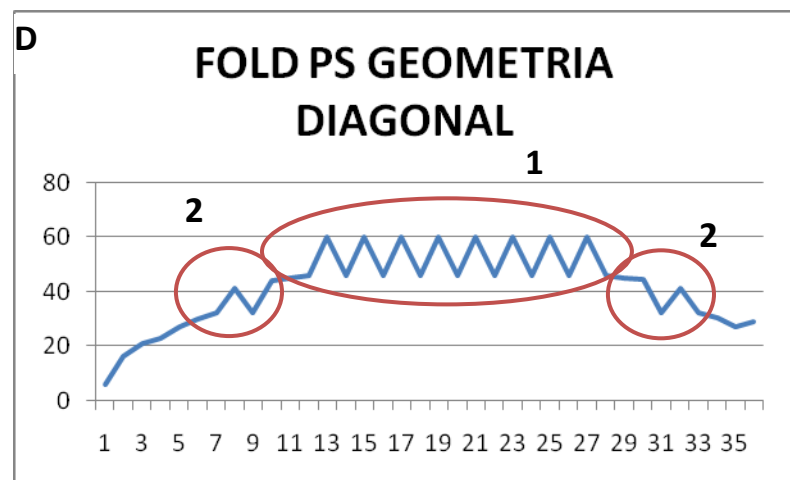
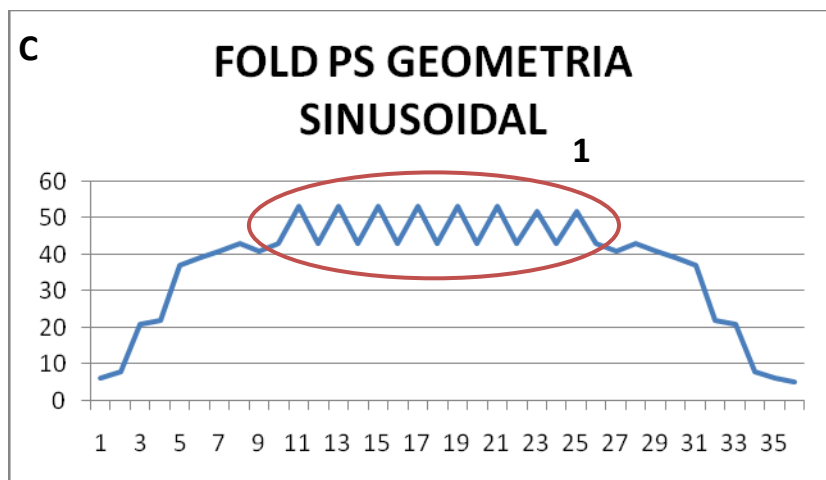
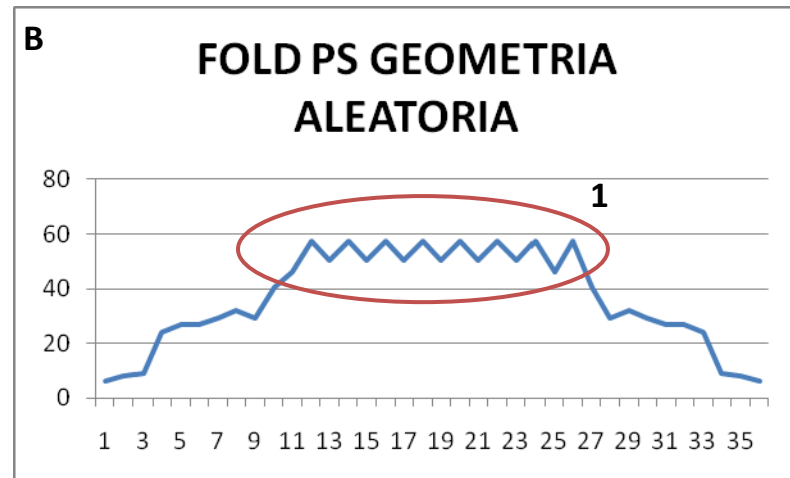
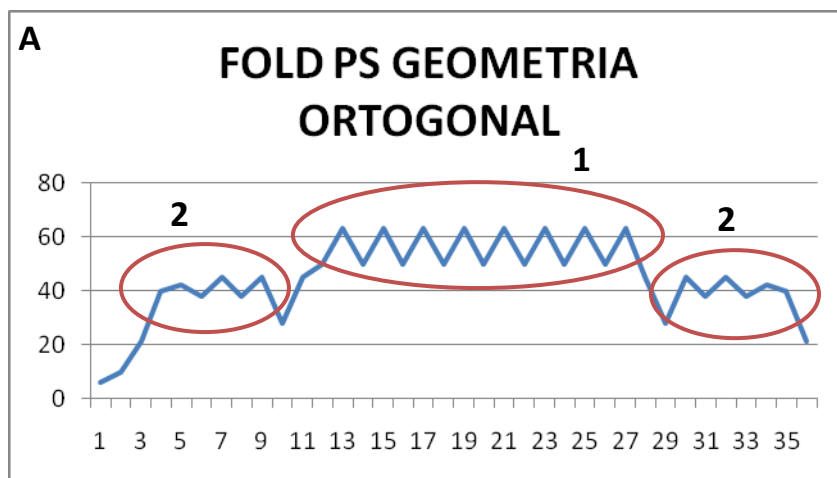


Figura 59. Diagrama de cubrimiento PS. **A.** Geometría Ortogonal, **B.** Geometría Aleatoria. **C.** Geometría sinusoidal, **D.** Geometría diagonal

En la figura 59A se identifica que la geometría ortogonal presenta dos patrones de periodicidad.

En la geometría sinusoidal (Figura 59.C) se observa que las variaciones de *fold* son suaves con respecto a la variación de *fold* en la geometría ortogonal, se identifica un patrón de periodicidad en el intervalo de *fold* 53.2 y 43.

En la Geometría aleatoria se observa que la huella del diseño aún es preservada, pero este oscila en menor intervalo comparado con las demás geometrías. El intervalo de variación del *fold* es de 46.7 a 50.5 *fold*.

En la Figura 59.D se identifica dos patrones de periodicidad, el primero oscila en el intervalo de 32-41 y el segundo de 46 a 60.

En la Tabla 10. Se presenta un resumen de los patrones identificados para cada geometría.

Tabla 10. Patrón de las líneas de receptor.

Geometría	Patrón 1 (<i>Fold</i>)	Varianza Patrón 1	Patrón 2 (<i>Fold</i>)	Varianza patrón 2
Ortogonal	50-63	13	45-38	7
Aleatoria	46.7-50.5	3.8	-----	-----
Sinusoidal	43-53.2	10.2	-----	-----
Diagonal	46-60	14	41-32	9

En general la geometría que presentó menor oscilación en el valor del *fold* para el patrón de la huella de las líneas de receptor corresponde a la geometría aleatoria. El efecto de la huella del diseño es principalmente visible en geometrías ortogonales y diagonales.

7.4.4 Análisis de la varianza de la amplitud en el dominio del número de onda

El número de onda es magnitud de frecuencia que indica el número de veces que vibra una onda en unidad de distancia. Es importante evitar variaciones fuertes en el número de onda para evitar *aliasing* de la señal.

El análisis de la huella del diseño, fue realizado a cuatro configuraciones geométricas de adquisición: ortogonal, aleatoria, sinusoidal y diagonal con el objeto de identificar cual geometría oscila menos la amplitud y atenúa este efecto.

En la Figura 60.A se observa la huella del diseño tanto para los receptores como los disparos, la mayor variación de la amplitud está representada por el color rojo y corresponde a 144.49dB. Para la geometría aleatoria (Figura 60.B) la huella del diseño no es distinguible, se identificó picos de amplitud pero en forma puntual (1) de 144.49dB. Pero en general la distribución de la amplitud es homogénea.

El efecto de patrón de la línea de disparos se observa en ambas geometrías: diagonal y sinusoidal debido a la mayor variación en las amplitudes.

En la Figura 60.A en el sector (1) se observa el efecto de las líneas de disparo en dirección diagonal. En general el diseño conserva las amplitudes homogéneas aproximadamente 144.49 pero las oscilaciones con amplitud de 63.3dB son visibles en la dirección diagonal en donde se ubicaron las líneas de disparo. Por lo cual se puede concluir que el efecto de la huella del diseño en la dirección de las líneas de disparo aun permanece.

Este experimento comprueba que la geometría diagonal imprime el efecto del diseño en la dirección de las líneas de disparo contrario al experimento de Lawton (2003) quien identificó que la geometría diagonal disminuye el efecto del de la huella del diseño en la dirección de las líneas de disparo en un diagrama de iluminación. Es importante resaltar que la geometría diagonal enmascara el efecto del *footprint* en el diagrama de cubrimiento. Por lo cual es recomendable realizarlo en el dominio del número de onda.

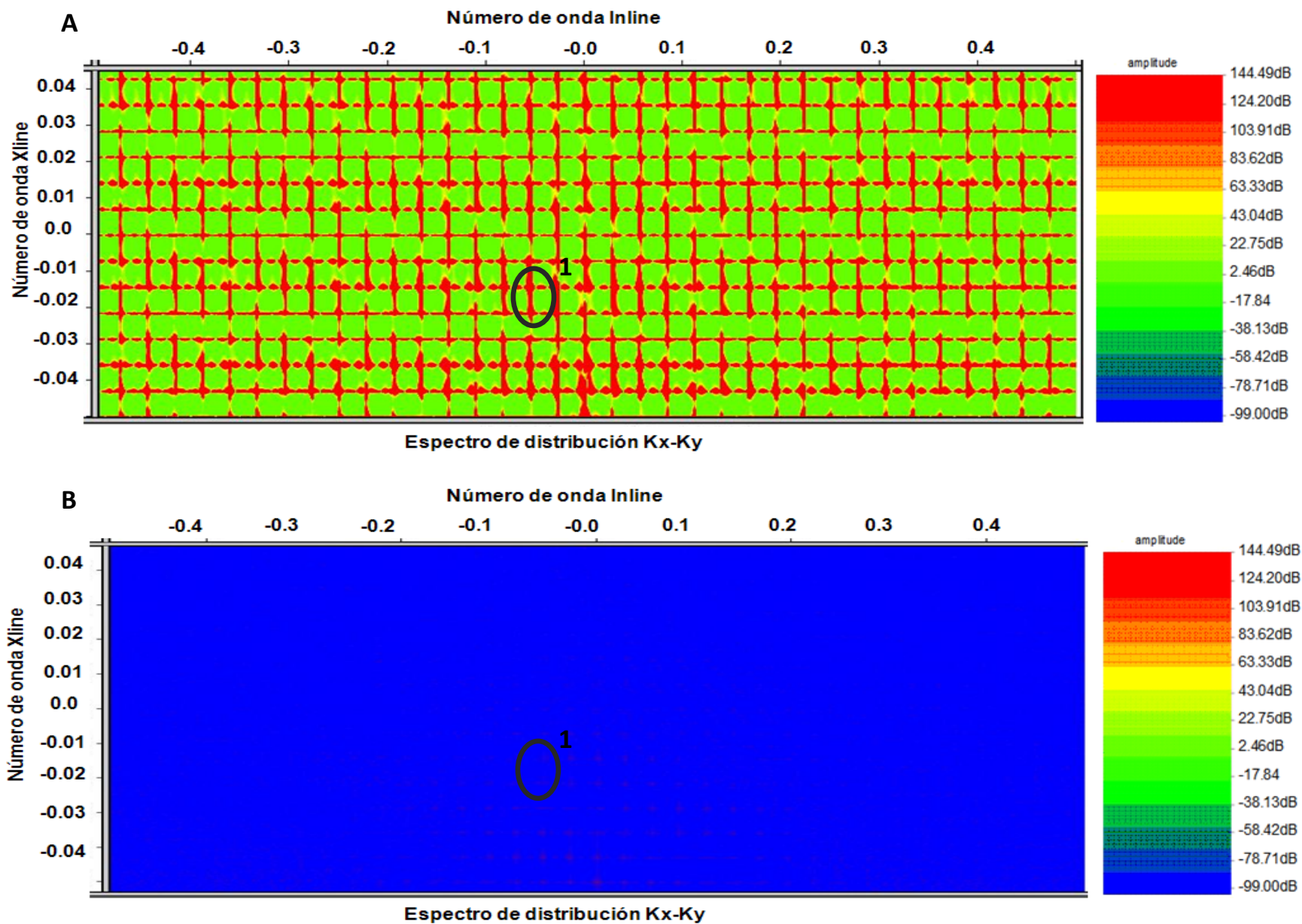


Figura 60. Análisis del Espectro del número de onda **A.** Geometría Ortogonal, **B.** Geometría Aleatoria.

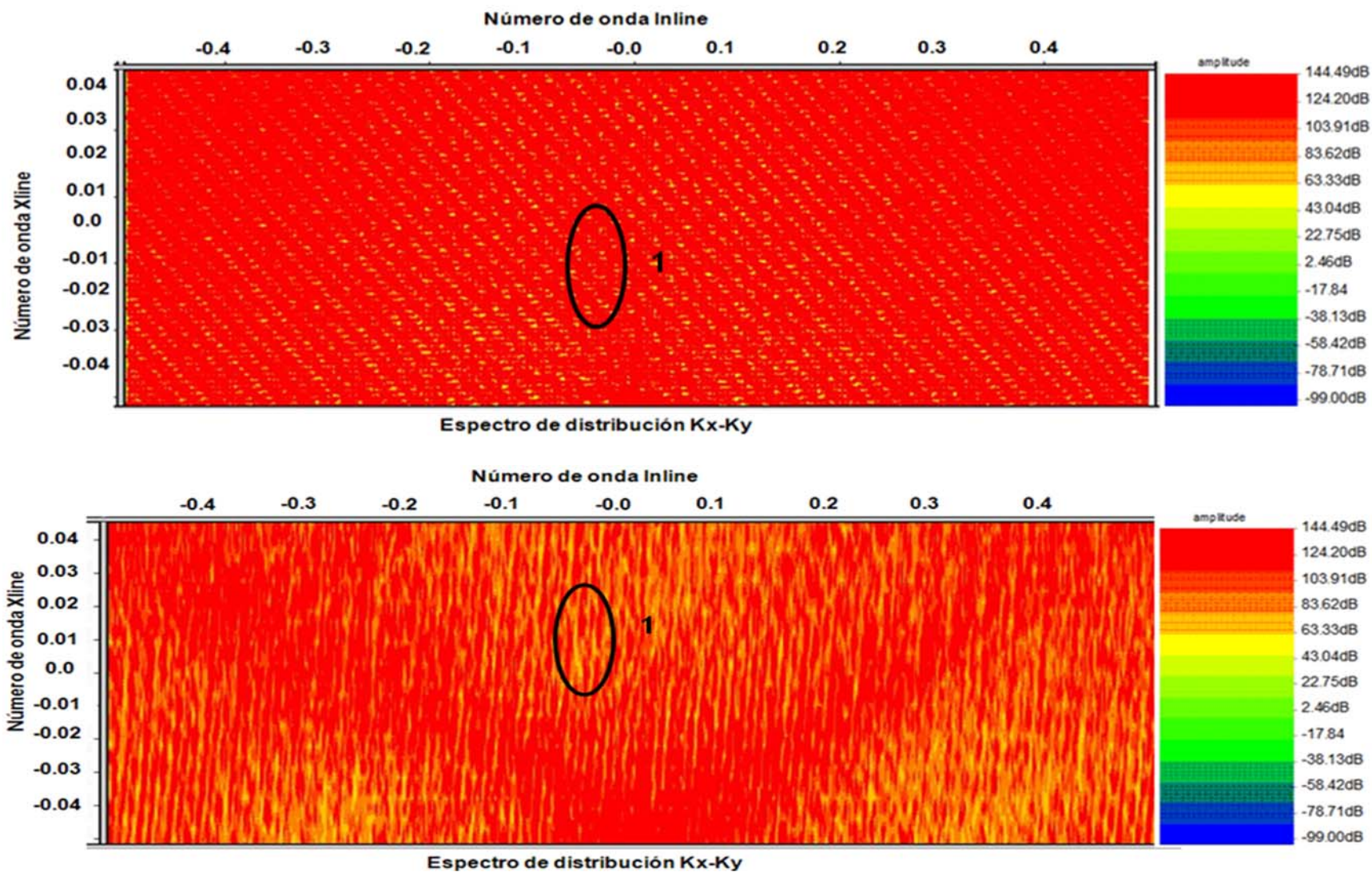


Figura 61. Análisis del espectro del número de onda. **A.** Geometría diagonal, **B.** Geometría Sinusoidal.

8. CONCLUSIONES

La variación en la distribución del *offset* en yacimientos compartimentalizados (modelos B-C) no es significativa, debido a la topografía suave del Campo Tenerife.

El Histograma de cubrimiento en capas planas (modelo A) presenta variaciones que están asociadas al efecto de la huella del diseño mientras que en modelos complejos estas variaciones no son visibles por lo cual no es muy claro correlacionarlas al efecto de la huella del diseño.

El efecto de la huella del diseño en la dirección de las líneas de disparo es suavizado en zonas donde la estructura presenta mayor buzamiento.

Según la respuesta sísmica y el contenido de frecuencias la configuración de patrón óptima para iluminar el horizonte de mugrosa C tanto para la onda PP y PS está en el rango de 10 y 15 metros de profundidad y 1800-3600 gramos.

Tamaños de carga superiores a 3600 gramos en la zona del Cuaternario no mejoran la calidad de la información sísmica.

Para depósitos no consolidados el contenido de frecuencias del registro sísmico de onda convertida presenta un pico en las bajas frecuencias (10-20 Hz) y decae rápidamente excepto en la configuración de patrón óptima 1x15x3600.

En la zona del Terciario Onda PS se evidencia que patrones de carga de 15 metros favorece el contenido de frecuencias en una ventana más amplia que en la profundidad de 10 metros.

El criterio más relevante para seleccionar carga y profundidad en el Terciario es la que genere menor costo, porque los registros presentan similar contenido de frecuencias puesto que la atenuación es baja en este tipo de formaciones.

Para el caso de Tenerife, se observó que un tamaño de *bin* de 10x20 presenta similar iluminación que un tamaño de *bin* cuadrado 10x10. Esta observación podría ayudar a disminuir los costos para futuros proyectos en el área porque

anteriormente se había determinado que un tamaño de *bin* de 10x10 era el necesario para identificar geoformas meándricas en el Campo Tenerife.

Es útil emplear geometrías de *bin* rectangulares, siempre y cuando el ancho del rectángulo sea en la dirección de las líneas de receptoras (Lawton, 2003) porque si se realiza en la dirección de las líneas de disparo, se estaría perdiendo resolución lateral y la interpretación del canal meándrico se ve afectada.

Para tamaños de *bin* cuadrados 20x20 la interpretación del canal se vio afectada porque no es posible interpretar meandros o zonas en las cuales el canal presenta mayor sinuosidad, cambiando definitivamente la interpretación de la geoforma.

La aleatoriedad no garantiza disminución de la huella del diseño, es importante realizar un estudio de aleatoriedad en el tamaño de *bin* para determinar qué porcentaje de aleatoriedad disminuye el efecto de la huella del diseño y no que porcentaje de aleatoriedad incrementa el cubrimiento.

El análisis de la varianza en la dirección *crossline* en diagramas de cubrimiento permite identificar el efecto que una geometría de adquisición particular produce en la huella del diseño.

Para diagramas de cubrimiento la geometría aleatoria favorece a la atenuación de la huella del diseño en las líneas de disparo (Lawton 2003), pero si se analiza esta geometría en el dominio del número de onda se identifica que la huella del diseño en las líneas de disparo es preservada en la dirección diagonal.

La aleatoriedad de 2m-8m conserva el mismo valor de cubrimiento PS y el patrón de la huella del diseño se observa, a partir de la aleatoriedad de 8m se observa disminución del patrón de la huella del diseño en la dirección de las líneas de disparo es atenuada.

Geometrías que presenten menor oscilación de la amplitud en el dominio del número de onda presentan menos efecto de la huella del diseño.

9. RECOMENDACIONES

Es importante probar los parámetros de diseño en la etapa de modelado para realizar análisis de iluminación de la onda PP-PS para evitar efectos de adquisición de la huella del diseño.

Se recomienda, para próximos estudios de atenuación del efecto de la huella del diseño analizar la influencia de estos patrones en el dominio del número de onda, debido a que si se analiza solo en diagramas de cubrimiento, la geometría diagonal tiende a enmascarar el efecto de la huella del diseño en la dirección de las líneas de disparo.

Es recomendable antes de adquirir un programa sísmico 3D, realizar pruebas con diferente carga para analizar la respuesta sísmica cuando se quiere integrar diseños de Onda PP y PS.

Para la zona del Terciario es recomendable emplear tamaños de carga entre 2700 y 3600 en un rango de profundidades de 10-15 metros

Para la zona del cuaternario es recomendable usar profundidades de carga superiores a los 15 metros debido a que en esta zona el espesor de la capa meteorizada es mayor que en las demás zonas del Campo.

Es importante conocer el espesor de la capa meteorizada para sugerir la profundidad de la carga con el objetivo de evitar registros de baja energía, además ahorrar dinero, porque erróneamente se podría sugerir cargas con mayor tamaño para compensar estos disparos de baja energía.

Tomando ventaja que en el Campo Tenerife existe una línea 2D-3C sería recomendable calcular los parámetros de diseño a partir de la información apilada 2D3C, para estandarizar los requerimientos de diseño al Valle Medio del Magdalena.

A partir de interpretaciones estratigráficas de las canales para secciones apiladas con onda PS, sería interesante realizar pruebas de resolución lateral para la onda convertida.

Para disminuir el efecto de la huella del diseño se sugiere introducir aleatoriedad a las líneas de fuente y receptor, pero es importante probar varias distancias preferiblemente que se encuentren en el intervalo de distancia del tamaño de *bin*,

La deformación en las estructuras geológicas tiene la ventaja de disminuir el efecto de la huella del diseño en la dirección de las líneas de disparo, por tal razón es importante realizar estudios para enfocar la atenuación de la huella del diseño en la dirección de los receptores.

Si se va a emplear geometría aleatorias es recomendable analizar variando el porcentaje de aleatoriedad para definir la distancia que realmente disminuya el efecto y no la que aumente el valor de cubrimiento. Porque si no se realiza de esta forma solo se estaría aumentando el cubrimiento “costos” y no atenuando el efecto de la huella del diseño.

Se recomienda utilizar patrones de carga entre 2700 y 3600 gramos para el campo Tenerife a una profundidad de 15 metros para los dos tipos de onda PP-PS.

10. BIBLIOGRAFIA

Al-Bannagi, M., Fang F., 2005. Acquisition footprint suppression the truncated SvD technique: Case studies from Saudi Arabia: *The Leading Edge*, 24, 832-834.

Behle, A., Dorh, G. 1985. Converted waves in exploration seismic. *Seismic Shear Waves, Handbook of Geophysical Exploration*, Vol.15b Geophysical Press.

Cary, P.W., 1994a, 3D converted-wave processing, Joffre survey, *in*: 3D-3C seismic exploration, CREWES Project tutorial notes.

Cooper, J., Margrave F., Lawton 2007, Simulations of seismic acquisition footprint: CREWES Research Report, 19, 28.1-28.20p

Cordsen, A., 2002, Narrow-versus wide-azimuth land 3D seismic surveys. *The Leading Edge*, 764-770p.

Cordsen, A, Galbraith, M., and Peirce, J., 2000., Planning land 3-D surveys, *Geophysical Developments No 9*, Hardage, B.A., ed., Society of Explorations Geophysicists.

Cordsen, A, 1999, How much Randomness is good for 3-D design?: 69th Ann. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts.

Cordsen, A., and Lawton, D.C., 1996, Designing 3-component 3D seismic survey: Expanded abstract, 66th Annual Meeting of the Society of Exploration Geophysicists, Denver.

Cordsen, A., 1993b, Flexi-Bin® 3D seismic acquisition method: Can. Soc. Expl. Geophys. Ann, Mtg. Abstracts, p.19.

Duarte, M., 2008 Informe de diseño de parámetros sísmicos 3D Campo Tenerife, Informe interno de Ecopetrol S.A., 1-5.

Eaton, D. and Lawton, D.C., 1992, P-SV stacking charts and binning periodicity: *Geophysics* 57, 745-748.

Eaton, D and Stewart, R., 1991, The Fresnel zone for P-SV waves. *Geophysics* vol 56 No3. 360-364p

Eaton, D., Slotboom R., Stewart, R., Lawton, D., 1990, Depth variant converted wave stacking: *60th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 1 107-110.

Eaton, D.W.S., Stewart, R.R., and Harrison, M.P., 1990, The Fresnel zone for mode-converted (P-SV) waves: *Geophysics*, in press.

Ecopetrol, 2009, Tenerife 3D/3C Seismic Evaluation and Design, Informe Interno de Ecopetrol S.A., v.1 p5

Ecopetrol, 2003, Diagnóstico y Estrategias de Recobro, Campo Tenerife, Informe Interno de Ecopetrol S.A., 97 pp.

Falconer, S., 2008. Footprint removal: Master's thesis, University of Houston.

Galbraith. M. 1994., 3-D survey design by computer: Course Notes, Seismic Image Software Ltd.

Garrotta, R., Vuillermoz, C., 1990, Comparing 3-D operations and results from converted P-S waves: *60th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 1086-1088.

Gesbert, S., 2002, From acquisition footprints to true amplitude: *Geophysics*, 67, 830-839p.

Google Earth. Valle Medio del Magdalena Tenerife. [En línea]. <<http://earth.google.es/>>

Guevara, S., 2010 Diseño de parámetros sísmicos Tenerife 3D-3C, Informe interno de Ecopetrol S.A., 6p.

Guevara, S., 2006. Converted waves applied to fracture detection in the Catatumbo Area, Colombia. CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro - Vol. 3 Núm. 2.

Han-xing Lu, Kevin W. Hall, Robert R. Stewart, and Robert E., 2005. Comparison of three field parameters from a 3C-2D test line, Conroe, Texas. CREWES Research Report, Annual Research Report, Volume 17, 1-22.

Lane, M., 1994, An implementation of 3-D seismic binning. CREWES Research Report, Annual Research Report, Volume 6, 24-1, 24-5.

Lansley, M., 1998. Multicomponent 3-D seismic pilot study in the Orinoco heavy oil belt. The Leading Edge, December.

Lansley, M., 1994, 3-D seismic design: SEG course notes. Society of Exploration Geophysicists.

Lawton, D.C., 2003, Considerations in 3-D depth-specific P-S survey design. CREWES Project, Annual Research Report, Volume 15.

Lawton, D.C., 2001, Binning considerations for a sparse 4C-3D seismic geometry, CREWES Project, Annual Research Report, Volume 15.

Lawton, D.C., 1993, Optimum bin size for converted-wave 3D asymptotic mapping: CREWES Project, Annual Research Report, Volume 5, 1-14.

Magrave, G., Cooper, J., 2007 Seismic Modelling in 3D for Migration Testing: CREWES Research Report, 19, 23.1-23.24 CREWES Project, Annual Research Report, Volume 9.

Magrave, G., Lawton, D.C., Stewart, Robert., Miller, Susan. 2007. The Blackfoot 3C-3D seismic survey: A case study.

Marfurt, K. J., R. M. Scheet, J. A. Sharp, and M. G. Harper, 1998, Suppression of the acquisition footprint for seismic sequence attribute mapping: *Geophysics*, 63, 1024–1035.

Martinez, W., Mendez, A., Rubio, W., 1988., Ideas sobre la geología estructural de noreste de Colombia y su relación con los campos de petróleo. III Simposio Bolivariano Explor. Petrolera de la Cuencas Subandinas, Caracas.

Miall A., 1996. *The Geology of Fluvial Deposits; Sedimentary Facies, Analysis and Petroleum Geology*. Berlin, Springer-Verlag,. 582.

Musser, L., Bremmer, D., Crews, G.A, 1989., Application of new seismic technology to land 3-D surveys: Implementation: 59th *Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys.*, Expanded Abstracts, 628-63 1.

Press, F., 1996. Seismic velocities unconsolidated sediments; *Geol. Soc. Am.*, Mem.97, 195-218.

Sandoval, J., 2010. Modelo estructural Campo Tenerife. Informe Interno Ecopetrol, S.A.

Sandoval, J., 2010. Cartografía Geológica Campo Tenerife. Informe Interno Ecopetrol, S.A.

Sandoval, J., 2009. Modelo estructural Campo Tenerife. Informe Interno Ecopetrol, S.A.

Schuster, G., Liu 2001., Seismic Array theorem and rapid calculation of acquisition footprint noise, *Geophysics*, 66, 1843-1849p.

Sengbus, R. 1983., *Seismic Exploration Methods: Seismic wave propagation*, Library of Congress Cataloging in Publication Data., 15p.

Stewart, R., 1999. 3-D multicomponent survey design: P-P versus P-S *fold*. CREWES Project, Annual Research Report, Volume 11.

Stone, D., 1994, Designing seismic surveys in two and three dimensions: SEG investigations in geophysics, 5. Society of Exploration Geophysicists.

Suarez, M. 1996., Facies análisis of the Upper Eocene La Paz Formation and Regional Evaluation of the Post_Middle Eocene Stratigraphy, Northern Middle Magdalena Valley, Colombia. University of Colorado, Boulder, U. S. A.. 88p.

Tessmer , G., Behle, A., 1988., Common Reflection point data-stacking technique for converted waves: Geophysical Prospecting, 672-676 p.

White, J. 1978. Generation and propagation of seismic waves: Houston, Pexcon Press, 13 p.

Wiest, B., 1984. Foodplain alluvium 2.4-4.3: Geophys. Prosp., 32, 1091-1102.

Xoefeng, Z., and Shifan Z., 2007. 3C/3D Seismic Exploration Technology and Application Results, Expanded abstract, Annual Meeting of the Society of Exploration Geophysicists, San Antonio.

Yilmaz, O., 1987. Seismic data processing: Society of Exploration Geophysicists. Volume 1.